

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра приладобудування

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані  
технології та системи точної механіки»**

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології»**

**на тему: «Масовий витратомір»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ПМ-61

Васильюк Вадим Васильович \_\_\_\_\_

Керівник:

к.т.н., доцент

Писарець Анна Валеріївна \_\_\_\_\_

Консультант з технічної частини:

д.т.н., професор

Антонюк Віктор Степанович \_\_\_\_\_

Рецензент:

к.т.н., доцент

Шевченко Вадим Володимирович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному  
проєкті немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

# ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

[illegible]

				ДП ПМ61 00.000.00		
	ПБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Розробн.					1	1
Керівн.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПБ Гр. ПМ-61	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.						

**Пояснювальна записка  
до дипломного проєкту  
на тему: «Масовий витратомір»**

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудівний факультет

Кафедра приладобудування

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи точної механіки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

Василюку Вадиму Васильовичу

1. Тема проєкту «Масовий витратомір», керівник проєкту Писарець Анна Валеріївна, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом проєкту \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проєкту Вимірюване середовище – вода. 3.2 Номінальний діаметр  $D_n=50 \cdot 10^{-3}$  м. 3.3 Діапазон вимірюваних витрат,  $m^3/год$ :  $Q_{min}-0.28$ ;  $Q_{max}-35.4$ . 3.4 Перепад тиску при  $Q_n$  – не більше 10 кПа. 3.5 Максимальний робочий тиск вимірюваного середовища – 1,6 МПа. 3.6 Температура вимірюваного середовища,  $^{\circ}C$ :  $+0 \div +40$ . 3.7 Температура навколишнього середовища,  $^{\circ}C$ :  $+5 \div +50$ . 3.8 Допустима відносна похибка, % – 1. 3.9 Ступінь захисту IP65.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) Огляд і аналіз існуючих масових витратомірів. Розробка схеми вимірювання. Розробка математичної моделі масового витратоміра. Розрахунки конструктивних елементів приладу. Розрахунки метрологічних характеристик масового витратоміра. Розробка конструкції приладу. \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 5.1. Принципова схема витратоміра, 1 арк. ф. А2. 5.2. Витратомір. 3-D модель, 1 арк. ф. А2. 5.3. Витратомір. Складальний кресленик, 1 арк. ф. А1. 5.4. Робочі креслення деталей, 1 арк. ф. А1. 5.5. Графічні матеріали, 1 арк. ф. А1.

6. Консультанти розділів проєкту\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технологічний	Антонюк В. С.		

7. Дата видачі завдання 30 квітня 2020 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Одержати у керівника дипломного проєкту (ДП) затвердженого завідувачем кафедри завдання на ДП	30 квітня 2020 р.	
2.	Виконання пояснювальної записки ДП	05 червня 2020 р.	
3.	Виконання технологічного розділу ДП, передача на перевірку та одержання підпису консультанта	05 червня 2020 р.	
4.	Виконання графічних матеріалів ДП	05 червня 2020 р.	
5.	Подання керівнику для перевірки: ДП та тексту його остаточного варіанту в електронному вигляді, одержання відгуку на ДП	08 червня 2020 р.	
6.	Одержання рецензії на ДП	09 червня 2020 р.	
7.	Подання ДП на кафедру, одержання грифу «До захисту допущено» у завідувача кафедри	09 червня 2020 р.	
8.	Подання ДП, відгуку та рецензії в екзаменаційну комісію університету	15 червня 2020 р.	
9.	Захист дипломного проєкту в екзаменаційній комісії університету	16 червня 2020 р.	
10.	Подання повної електронної версії ДП на кафедру для розміщенню в ELAKPI	17 червня 2020 р.	

Студент

Вадим ВАСИЛЮК

Керівник

Анна ПИСАРЕЦЬ

---

\* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту.

# Реферат

Дипломний проект складається з вступу, двох розділів, переліку посилань і додатків. Загальний об'єм складає 54 сторінки, містить 5 таблиць, 22 рисунки.

У проектно-конструкторському розділі розглянуто властивості вимірюваного середовища, методи вимірювання масової витрати, а також методи і засоби вимірювання густини. Розроблено структурну та принципову схеми вимірювання і математичну модель розроблюваного приладу. Проведено розрахунок статичної характеристики ультразвукового масового витратоміра. За допомогою програмного продукту SolidWorks створено 3D – модель приладу.

У технологічному розділі описано конструкцію приладу, розроблено схеми складального складу та технологічної складності. Проведена оцінка технологічності приладу та проведений розрахунок розмірного ланцюга. Розділ закінчується розробкою технологічного процесу складання приладу.

**Ключові слова:** масова витрата, витратомір, методи вимірювання, п'єзоелектричний перетворювач.

## ABSTRACT

The diploma project consists of an introduction, two sections, the list of literary sources and appendices. The total volume is 54 pages, contains 5 tables, 22 figures.

The design section describes the properties of the measured medium, methods for measuring mass flow, as well as methods and means for measuring density. A structural and schematic diagram of the measurement and a mathematical model of the instrument under development have been developed. The static characteristic of the ultrasonic mass flowmeter is calculated. A 3D model of the instrument was created using the SolidWorks software product.

The technological section describes the design of the instrument, developed schemes of Assembly composition and technological complexity. The instrument's manufacturability was evaluated and the size range was calculated. The section ends with the development of the technological process of instrument Assembly.

Keywords: mass flow, flow meter, measurement methods, piezoelectric converter.

**Keywords:** mass flow, flow meter, measurement methods, piezoelectric converter.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ ТА ЇХ ВИЗНАЧЕНЬ .....	5
ВСТУП .....	6
ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ .....	7
1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МАСОВИХ ВИТРАТОМІРІВ ....	7
1.1. Вимірюване середовище .....	7
1.2. Методи вимірювання масової витрати .....	11
1.2.1. Витратоміри для безпосереднього вимірювання масової витрати.....	11
1.2.2. Застосування об'ємних витратомірів для вимірювання масової витрати.....	16
1.3. Методи та засоби вимірювання густини .....	19
2. РОЗРОБКА СХЕМИ ВИМІРЮВАННЯ .....	22
2.1 Перетворювач витрати.....	22
2.2. Розробка структурної схеми.....	26
2.3. Розробка принципової схеми .....	31
3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ .....	32
4. РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК .....	33
4.1 Статична характеристика .....	33
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ .....	38
1. ОПИС ВИБРАНОГО ПРИЛАДУ.....	38
2. ПОБУДОВА СХЕМИ СКЛАДАЛЬНОГО СКЛАДУ .....	39
3. ПОБУДОВА ТЕХНОЛГІЧНОЇ СХЕМИ СКЛАДАННЯ.....	40
4. ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ПРИЛАДУ.....	41



5.	РОЗРАХУНОК РОЗМІРНОГО ЛАНЦЮГА.....	43
6.	РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ ПРИЛАДУ.....	44
	ВИСНОВКИ.....	45
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	46
	ДОДАТКИ	

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ЦП – центральний процесор;

ОЗП – оперативно-запам'ятовуючий пристрій;

ПЗП – постійно запам'ятовуючий пристрій;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ЦАП- цифро-аналоговий перетворювач;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

РКІ – рідинно-кристалічний індикатор;

ОП – обчислювальний пристрій;

ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

З кожним роком все більш актуальним постає питання контролю та обліку води, оскільки через постійний розвиток технологій збільшення вартості води і енергетичних ресурсів, та жорстких заходів щодо захисту навколишнього середовища, призвели до зростання потреб у вимірюванні витрати.

Основним фізичним параметром, що визначає оптимальні режими роботи об'єктів і якість процесів у системах автоматичного регулювання теплоенергетичних установок, різних хімічних процесах, ракетній і авіаційній техніці є масова витрата.

На даний час існує велика кількість як процесів, так і технологічних виробництв, де оцінкою по масі продукції є саме контроль масової витрати речовин.

Визначення густини важливе у системах кількісного обліку речовин при їх транспортуванні, зберіганні і прийманні, якщо маса речовин невідома і не може бути виміряна звичайним зважуванням. Визначати її доводиться за вимірюванням об'єму і густини речовин в динаміці, не перериваючи процес транспорту сировини по трубопроводах [1, 2].

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МАСОВИХ ВИТРАТОМІРІВ

Для визначення масової витрати використовують масові витратоміри і об'ємні витратоміри, функціональні можливості яких розширюються застосуванням вимірювачів густини у складі вузлів обліку [3].

#### 1.1 Вимірюване середовище

Рідина – неперервне середовище, що має властивість плинності, тобто здатна необмежено змінювати свою форму під дією дуже малих сил, але на відміну від газу, мало змінює свою густину при зміні тиску [4].

*Густина* – це маса рідини в одиниці об'єму. Для однорідної рідини густина розраховується за формулою

$$\rho = \frac{m}{V},$$

де  $m$  – маса рідини в одиниці об'єму  $V$ .

Якщо рідина неоднорідна, то ця формула дозволяє обчислити лише середнє значення густини, а справжня густина в будь-якій точці може бути визначена як

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}.$$

*Питома вага* – це вага рідини в одиниці об'єму

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{gm}{V} = g\rho,$$

					ДП ПМ6102.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

де  $G$  – вага.

*Стисливість* – це властивість рідини змінювати свій об'єм під дією тиску. Стисливість характеризується двома величинами: коефіцієнтом об'ємного стиснення  $\beta_p$  і об'ємним модулем пружності  $K$ .

*Коефіцієнт об'ємного стиснення* – це відносна зміна об'єму рідини, що припадає на одиницю тиску.

Знак "мінус" в цьому виразі введено для того, щоб цей коефіцієнт мав позитивні значення, оскільки  $\frac{dV}{dp}$  похідна завжди від'ємна.

Якщо  $\beta_p = \text{const}$ , то можна приблизно розрахувати об'єм і густину при зміні тиску:

$$V \approx V_0(1 - \beta_p \cdot \Delta p); \quad \rho \approx \frac{\rho_0}{(1 - \beta_p \cdot \Delta p)},$$

де  $V_0$ ,  $\rho_0$  – об'єм і густина рідини за тиску  $p_0$ ,  $\Delta p$  – зміна тиску.

Величина, обернена до коефіцієнту об'ємного стиснення називається *об'ємним модулем пружності*. Значення  $K$  залежить від температури і тиску

$$K = \frac{1}{\beta_p} = -\frac{V \cdot dp}{dV}.$$

*Температурне розширення* – властивість рідини змінювати свій об'єм при зміні температури. Характеризується коефіцієнтом температурного розширення  $\beta_t$ , який являє собою відносну зміну об'єму, що припадає на 1 градус

$$\beta_T = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}.$$

Коефіцієнт температурного розширення води збільшується із зростанням тиску і температури; для більшості інших крапельних рідин  $\beta_t$  із збільшенням тиску зменшується.

При зміні температури і тиску в невеликих межах можна прийняти  $\beta_t = \text{const}$ , і тоді об'єм рідини при зміні температури на величину  $dt = t - t_0$  обчислюється по формулі

$$V \approx V_0 (1 + \beta_T \cdot \Delta T),$$

при цьому

$$\rho \approx \frac{\rho_0}{(1 + \beta_T \cdot \Delta T)},$$

де  $V$  і  $V_0$  – об'єми;  $\rho$  і  $\rho_0$  – густина відповідно за температур  $t$  і  $t_0$ .

В'язкість – властивість рідини чинити опір зсуву її шарів. В'язкість із збільшенням температури зменшується. Характеристиками в'язкості є: динамічний коефіцієнт в'язкості  $\mu$  [Па\*с] і кінематичний коефіцієнт в'язкості  $\nu$  [м<sup>2</sup>/с].

Кінематичний коефіцієнт в'язкості розраховується по формулі

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}.$$

Вимірюваним середовищем є вода (табл. 1 – табл. 3).

Таблиця 1 – Залежність густини від температури

Температура, °C	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Температура, °C	Густина, кг/м <sup>3</sup>
0	999,9	50	988,1
4	1000	60	983,2
10	999,7	70	977,8
20	998,2	80	971,8
30	995,7	90	965,3
40	992,2	100	958,4

Таблиця 2 – Залежність коефіцієнта розширення від температур і тиску

Тиск, МПа	Температура t, °C				
	1-10	10-20	40-50	60-70	90-100
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,1	014	15	422	556	719
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	043	165	422	548	704
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	072	183	426	439	691
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	149	236	429	523	661
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
90	229	289	437	514	621

Таблиця 3 – Залежність коефіцієнта в'язкості від температури

Температура, °C	Кінематичний коефіцієнт в'язкості, м <sup>2</sup> /с	Температура, °C	Кінематичний коефіцієнт в'язкості, м <sup>2</sup> /с
0	0,0179	25	0,009
1	0,0173	30	0,008
2	0,0167	35	0,0072
3	0,0162	40	0,0065
4	0,0157	45	0,006
5	0,0152	50	0,0055
7	0,0143	60	0,0048
10	0,0134	70	0,0042
12	0,0124	80	0,0037
15	0,0114	90	0,0033
17	0,0109	100	0,0029
20	0,0101		



## 1.2 Методи вимірювання масової витрати

Методи вимірювання масової витрати умовно можна поділити на три групи [3, 5]:

- створення вимірювальних приладів здатних вимірювати безпосередньо масову витрату завдяки особливостям принципу дії;
- застосування об'ємних витратомірів у комплексі з перетворювачами густини, коригувальними схемами і електронними обчислювальними пристроями;
- застосування комбінованих витратомірів, що вимірюють масову витрату опосередкованими методами шляхом автоматичної обробки результатів прямих вимірювань пов'язаних із нею параметрів.

До першої групи можна віднести масові витратоміри прямої дії, що відносяться до силового і теплового класів [3, 5].

До другої групи відносяться об'ємні витратоміри обладнані вимірювачами густини. Масова витрата у такому випадку визначається шляхом окремих вимірювань об'ємної витрати і густини рідини та подальшою обробкою отриманих результатів за допомогою електронних обчислювальних пристроїв.

### 1.2.1. Витратоміри для безпосереднього вимірювання масової витрати

**Силіві витратоміри.** У таких приладах потік набуває прискорення під дією силового збурення, залежного від масової витрати. Вимірюється будь-який параметр, що характеризує ступінь цього збурення або його ефекту.

Прискорення потоку виникає в процесі зміни його первинного руху. Залежно від характеру цієї зміни і прискорення, що надається при цьому, силіві витратоміри поділяють на: кориолісові; гіроскопічні; турбосилові [3].

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Найбільшого поширення серед силових витратомірів отримали вібраційні кориолісові витратоміри.

*Кориолісовими* називають витратоміри, в перетворювачах яких під впливом силового збурення виникає кориолісове прискорення, залежне від витрати [3].

До вібраційних відносяться кориолісові витратоміри, в яких рухомий елемент перетворювача витрати не обертається, а лише здійснює неперервні коливання з постійною амплітудою або з амплітудою, що періодично згасає, під впливом зовнішнього силового збурення [3].

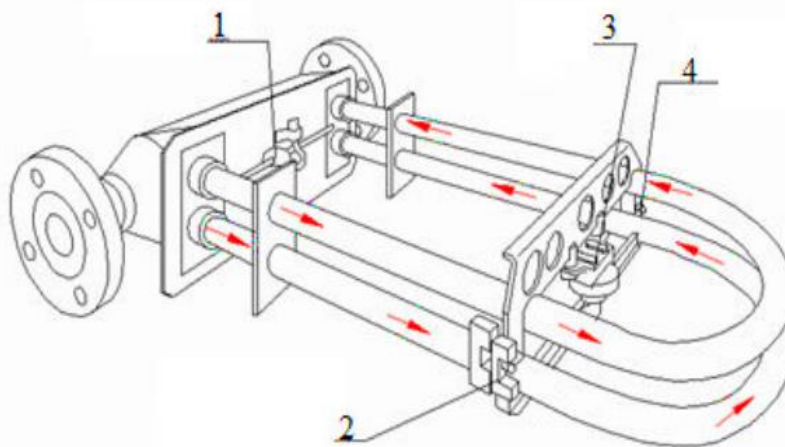


Рис. 1. Вібраційний кориолісовий витратомір [6]: 1 – термодатчик;

2 – індукційна котушка права; 3 – привід; 4 – індукційна котушка ліва

Принцип дії такого витратоміра базується на зміні фаз механічних коливань U-подібних трубок, по яких рухається вимірюване середовище (рис. 1). За допомогою котушки цим трубкам повідомляється коливальний рух, через це в системі з'являється додаткова сила інерції – сила Кориоліса, яка протидіє вібрації витратомірних трубок. У результаті чого трубки починають деформуватися. Деформація фіксується датчиками. При одночасному знятті сигналів відбувається зміщення за фазою. Це відносне запізнення прямо пропорційно масовій витраті.

Перевагами кориолісових витратомірів є [3, 5]:

- висока точність вимірювань;
- незалежність показань від в'язкості вимірюваного середовища;
- несуттєвий вплив профілю швидкості вимірюваного потоку на результати вимірювань;
- тривалий термін експлуатації;
- відсутність жорстких вимог до довжини обов'язкових прямих ділянок до і після приладу;
- простота обслуговування.

Недоліками таких приладів є гідравлічні втрати, пов'язані з особливостями конструкції.

**Теплові витратоміри.** Принцип дії таких витратомірів базується на вимірюванні залежного від витрати ефекту теплового збурення на потік або тіло, яке контактує з ним. Такі прилади призначені для вимірювання витрати газу та рідше для вимірювання витрати рідини [3].

Існує багато різновидів теплових витратомірів, що розрізняються способом нагріву, розташуванням нагрівача (зовні або всередині трубопроводу) і характером функціональної залежності між витратою і вимірюваним сигналом [3].

За характером теплової взаємодії з потоком такі вимірювачі витрати поділяються на: калориметричні, термоконвективні і термоанемометричні [3].

Основою роботи *калориметричних* витратомірів є залежність від потужності нагріву середньо масової різниці температур потоку (рис. 2).

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

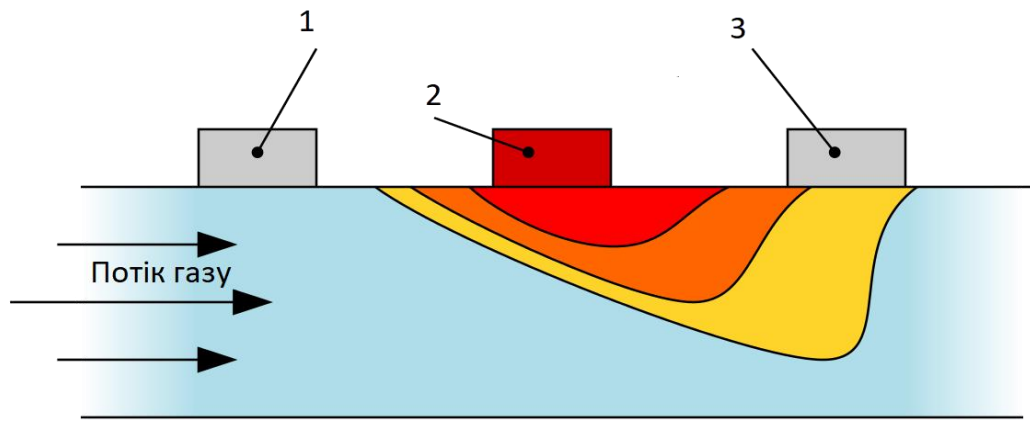


Рис. 2. Принципова схема калориметричного витратоміра [7]:

1, 3 – датчики температури; 2 – нагрівальний елемент.

Перевагами цього класу витратомірів є [3, 5]:

- досить висока точність, що оцінюється (в умовах індивідуального калібрування) приведеною похибкою  $\pm(0,5-1,0) \%$ ;
- широкий діапазон вимірювань;
- відносно мала інерційність.

Їх недоліки окреслюються складністю вимірювальних схем і нестабільністю характеристик, пов'язаною з корозією вторинних пристроїв і осадженням на них різних частинок, які переносяться потоком [5].

У *термоконвективних* теплових витратомірах нагрівач і термоперетворювач розташовуються зовні трубопроводу (рис. 3). Передача тепла від нагрівача до вимірюваної речовини здійснюється через стінку корпусу за рахунок конвекції [3]. У *термоконвективних* теплових витратомірах нагрівач і термоперетворювач розташовуються зовні трубопроводу. Передача тепла від нагрівача до вимірюваної речовини здійснюється через стінку труби за рахунок конвекції [3].

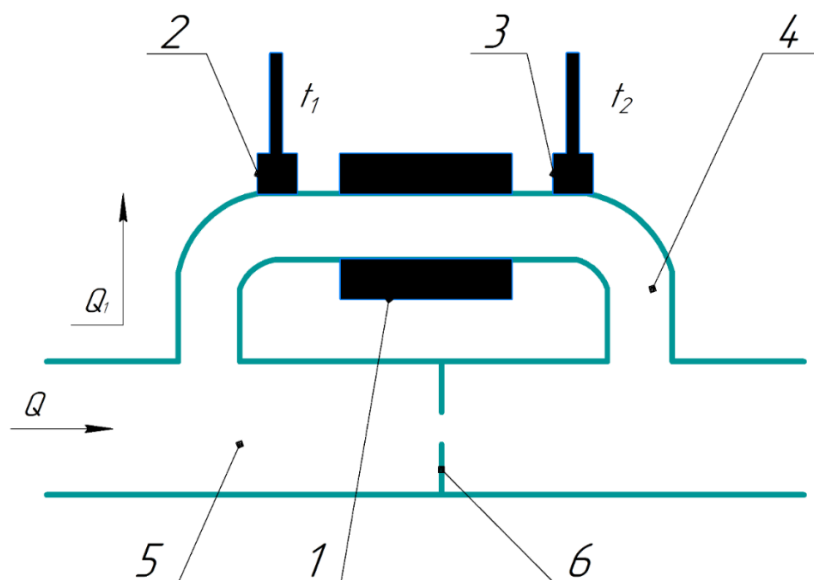


Рис. 3. Схема термоконвективного витратоміра [8]: 1 – нагрівальний елемент; 2, 3 – датчики температури; 5 – ділянка трубопроводу; 6 – дросель.

Перевагами таких вимірювачів витрати є [3, 5]:

- відсутність контакту з вимірюваною речовиною;
- широкий діапазон швидкостей; висока швидкодія, що дозволяє вимірювати швидкості, змінні з частотою в декілька тисяч герц;
- підвищена експлуатаційна надійність.

Серед недоліків приладів цього класу слід зазначити: значну інерційність; крихкість первинних перетворювачів внаслідок динамічних навантажень і високої температури нагрівання [3].

Принцип дії *термоанемометрів* базується на залежності між втратою тепла тіла, що неперервно нагрівається, та швидкістю вимірюваного середовища, в якому це тіло знаходиться (рис. 4) [3].

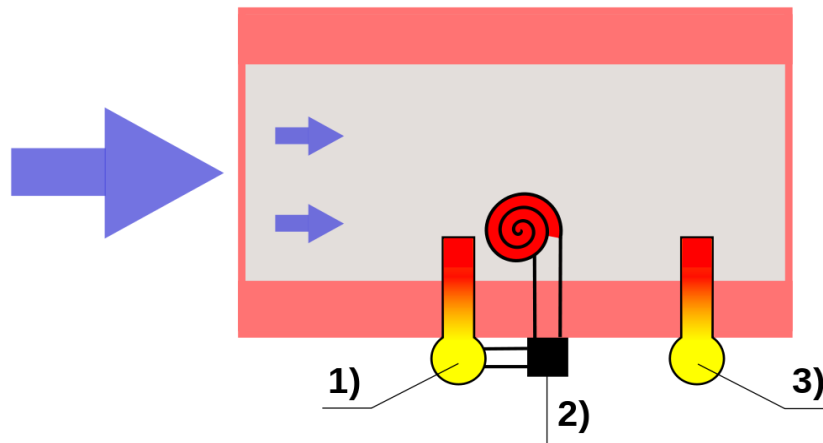


Рис. 4. Конструкція термоанемометричного витратоміра [7]: 1 – датчик температури нагрівного елемента; 2 – нагрівний елемент; 3 – датчик температури потоку.

Вони застосовуються для вимірювання витрати за відомого співвідношення між місцевою і середньою швидкостями потоку, або коли остання безпосередньо вимірюється за допомогою термоанемометра. Крім того, існують конструкції термоанемометрів, спеціально призначених для вимірювання витрати [3].

Перевагами термоанемометрів є [3]:

- широкий діапазон вимірюваних швидкостей;
- висока швидкодія.

Основним їх недоліком є істотний вплив на показання температури, тиску і різних теплофізичних параметрів вимірюваного середовища [3, 5].

### 1.2.2. Застосування об'ємних витратомірів для вимірювання масової витрати

Серед методів вимірювання об'ємної витрати широкого застосування набули метод змінного перепаду тиску, тахометричний, ультразвуковий, електромагнітний, вихровий тощо.

Витратоміри, що реалізують цей метод, дозволяють вимірювати витрату будь-яких газів та рідин при широкому діапазоні тисків, вологості та температур. Метод виміру витрати за перепадом тиску заснований на залежності перепаду тиску по різних боках звужуючого пристрою, встановленого в трубопроводі, від витрати вимірюваного середовища [3]. Під час протікання рідини через звужуючий пристрій, створюється перепад тиску, залежний від швидкості потоку, а також від витрати вимірюваного середовища.

У якості звужуючих пристроїв найбільш широкого застосування отримали сопла і труби Вентурі, діафрагми [3].

Переваги таких витратомірів [9]:

- універсальність використання;
- зручність для виготовлення в масовому виробництві;
- вимірювання в однофазних і багатофазних середовищах;
- широкий діапазон температур і тисків;
- серійне виготовлення запчастин.

Недоліки витратомірів із звужуючим пристроєм:

- квадратична залежність між витратою та перепадом тиску;
- вузький діапазон вимірювання;
- обмежена точність;
- залежність вимірювання від стану звужуючого пристрою, діаметру трубопроводу, сталого тиску і температури.

Розглянемо вимірювання масової витрати за допомогою труби Вентурі [10].

Масовий витратомір рідин містить: трубу Вентурі 1, дифманометр 2, за показами якого визначається об'ємна витрата рідини, вимірювальний трубопровід 13, обладнаний запірною-регулюючою арматурою на вході і виході з нього, п'єзoeлектричний перетворювач 9, встановлений на вимірювальному трубопроводі, генератор ультразвукових імпульсів 8 і обчислювальний пристрій електричних сигналів прийнятих і відбитих імпульсів, пов'язаних з п'єзoeлектричним перетворювачем 6 (рис. 5). У схему також включений датчик позначення часу 5 і мікроконтролер 4, що обробляє отримані дані, визначаючи за швидкістю проходження ультразвукової хвилі густину рідини і величину її масової витрати шляхом обчислення добутку об'ємної витрати і густини.

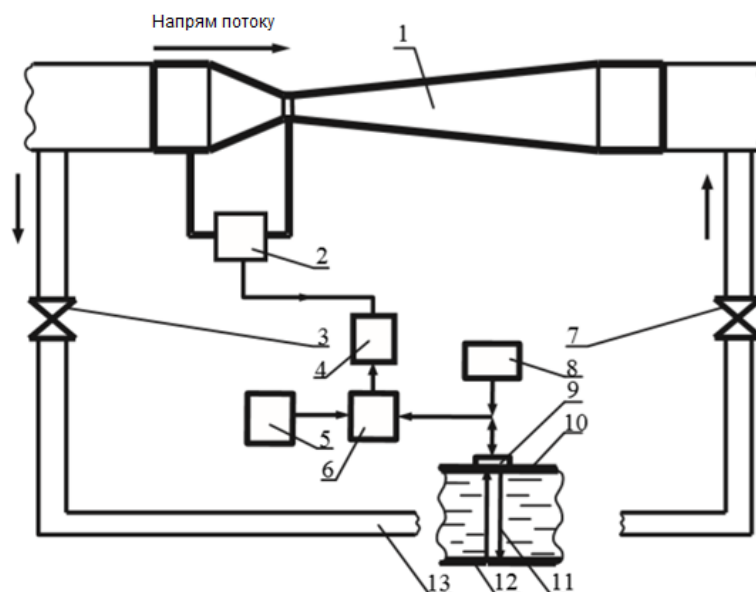


Рис. 5. Принципова схема масового витратоміра рідини

При визначенні масової витрати рідини за допомогою труби Вентурі 1 створюється місцеве звуження потоку, частина потенціальної енергії якого переходить в кінетичну енергію. Середня швидкість потоку в місці його



звуження підвищується, а статичний тиск стає менше статичного тиску до труби Вентурі 1. Різниця тисків (перепад тиску) вимірюється дифманометром 2, по величині показань якого визначається об'ємна витрата рідини. Дані з дифманометра надходять в мікроконтролер 4. При визначенні масової витрати рідини, особливо агресивних і нестабільних, необхідно вимірювати її густину, для цього пропонується використовувати ультразвуковий метод вимірювання [11, 12]. При цьому для вимірювання густини рідини вимірювальний трубопровід 13 заповнюється шляхом відгалуження частини загального потоку. Для регулювання подачі рідини вимірювальний трубопровід 13 обладнано запірно-регулюючою арматурою на вході (клапан 3) і виході (клапан 7) з нього. З цією метою клапан 7 відкривається, а клапан 3 закривається. Потім клапан 3 відкривається, і після заповнення рідиною вимірювального трубопроводу 13 послідовно закриваються клапани 7 і 3. Проводиться вимірювання густини рідини. Зовні стінки 10 вимірювального трубопроводу 13 встановлений п'єзоелектричний перетворювач 9, що працює в імпульсному режимі за сумісною схемою. При забезпеченні акустичного контакту між перетворювачем 9 і стінкою 10 випускається імпульс ультразвукової поздовжньої хвилі, що рухається у напрямку 11, перетинає стінку 10, шар рідини, стінку 12. Після відображення від межі розділу «стінка 12-повітря» ультразвуковий імпульс перетинає в зворотному напрямку стінку 12, шар рідини, стінку 10 і приймається п'єзоелектричним перетворювачем 9. З обробного пристрою 6 електричних сигналів відбитих імпульсів, що приймаються і дифманометра 2 дані надходять в мікроконтролер 4, що визначає по швидкості проходження ультразвукової хвилі густину рідини і величину масової витрати рідини шляхом обчислення добутку об'ємної витрати і густини. Потім клапани 7 відкриваються. Цикл вимірювань повторюється.

Найдоцільнішим представляється вимірювання масової витрати розширенням функціональних можливостей ультразвукового витратоміра.

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.3. Методи і засоби вимірювання густини

Густиномір – прилад для неперервного (або періодичного) вимірювання густини речовин у процесі їх виробництва або переробки, встановлюється безпосередньо в технологічних лініях або виробничих агрегатах [1].

Методи вимірювання густини поділяються на дві групи:

1) методи, в яких для вимірювань густини рідини вимірюють масу рідини при заздалегідь відомому об'ємі. У них для вимірювання маси застосовують або безпосереднє зважування рідини, що займає заздалегідь відомий об'єм, або вимір іншої фізичної величини, що має відомий функціональний зв'язок з масою рідини.

2) методи, де знати об'єм не потрібно, а вимірюється той чи інший фізичний параметр рідини, функціонально безпосередньо пов'язаний з густиною.

Методи першої групи реалізуються поплавковими, масовими, гідростатичними та вібраційними вимірювачами густини; другої - радіоізотопними та ультразвуковими густиномірами.

Принцип дії *поплавкових густиномірів* заснований на законі Архімеда. Розрізняють вимірювачі з плаваючим або зануреним поплавцем. У густиномірах з плаваючим поплавком мірою густини є глибина занурення поплавка в рідину. У густиномірах із зануреним поплавцем мірою густини слугує сила виштовхування, що діє на тіло, вона і пропорційна густині (глибина занурення є постійною). Поплавкові густиноміри застосовуються тільки для лабораторних вимірювань.

Похибка поплавкових густиномірів 0,2 ... 2% від діапазону шкали приладу.

*Масові густиноміри* (піднометричні прилади) базуються на порівнянні маси вимірюваного середовища, взятого в певному об'ємі, з масою дистильованої води, взятої в тому ж обсязі і за тої самої температури.

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Єдиним недоліком пікнометричного способу є тривалість визначення. Масові густиноміри застосовують зазвичай для вимірювання густини суспензій, а також в'язких рідин, що містять тверді включення. Їх похибка зазвичай становить 0,5...1% [ 1].

У *гідростатичних густиномірах* мірою густини  $\rho$  є різниця тисків  $\Delta p$  двох стовпів рідини різної висоти:  $\Delta p = \rho gh$ , де  $g$  - прискорення вільного падіння,  $h$  - різниця висот стовпів. Значення  $\Delta p$  вимірюється або безпосередньо (датчиками тиску), або як різниця тисків, тобто продуванням через речовину інертного газу (повітря), тиск якого пропорційний тиску стовпа речовини. Похибка таких густиномірів досягає 2...4 % від діапазону шкали приладу [ 1].

Принцип дії *вібраційних густиномірів* ґрунтується на залежності резонансної частоти коливань тіла в середовищі: ця частота тим менше, чим більше густина контрольованої речовини. Чутливий елемент, як правило, представляє собою відполіровану зсередини металеву трубку U - подібної форми. Спеціальний пристрій, притиснений до трубки зовні, призводить її в коливальний рух на резонансній частоті. Поки трубка не заповнена рідиною, вимірюється її резонансна частота  $\omega_0$ . Потім трубка поміщається безпосередньо в потік аналізованої рідини, від чого її частота коливань  $\omega$  змінюється.

Оскільки частота коливань може бути виміряна з високою точністю, то після калібрування за двома рідинами з відомими густинами похибка вимірювань виявляється досить малою, що не перевищує кілька сотих відсотка.

Принцип дії *радіоізотопних густиномірів* ґрунтується на визначенні зміни інтенсивності пучка  $\gamma$ - або  $\beta$  - променів у результаті їх поглинання або розсіювання шаром рідини (ослаблення пучка визначається, при фіксованій товщині шару, густини рідини). Ослаблення випромінювання пов'язане

					ДП ПМ6102.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

функціонально з густиною середовища. Похибка радіоізотопних вимірювачів густини  $\sim 2\%$  від діапазону шкали приладу.

Основою принципу дії *ультразвукового густиноміра* є залежність швидкості звуку в середовищі від його густини

$$\rho = c \sqrt{K_{\beta}}$$

де  $K_{\beta}$  – коефіцієнт зв'язку між густиною і стисненням, залежний від температури рідини.

Ультразвукові коливання у середовищі створюють будь-яким тілом, що коливається, дотичним до середовища. Вимірюючи тим чи іншим способом швидкість поширення ультразвуку у даному середовищі визначають його густину.

Похибка ультразвукового густиноміра становить 2-5% від діапазону шкали.

## 2. РОЗРОБКА СХЕМИ ВИМІРЮВАННЯ

Розвиток п'єзо електронної акустики і сигнальної мікропроцесорної техніки розкривають широкі можливості для створення високоточних приладів вимірювання з використанням нових інформаційних технологій.

### 2.1. Перетворювач витрати

Оскільки акустичні коливання і хвилі є універсальними носіями інформації про стан різних об'єктів. Простота випромінювання-прийому ультразвукових хвиль у поєднанні зі здатністю поширюватися практично в будь-яких середовищах дозволяють широко застосовувати ультразвукові витратоміри для вимірювання витрати рідини в трубопроводах.

*Класифікація ультразвукових витратомірів.* Фазові ультразвукові витратоміри – працюють за принципом залежності фазових зрушень

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ультразвукових коливань, що утворюються на прийомних п'єзoeлементax, від різниці часів проходження коливаннями однакової відстані за потоком рідини, і проти нього (рис. 6).

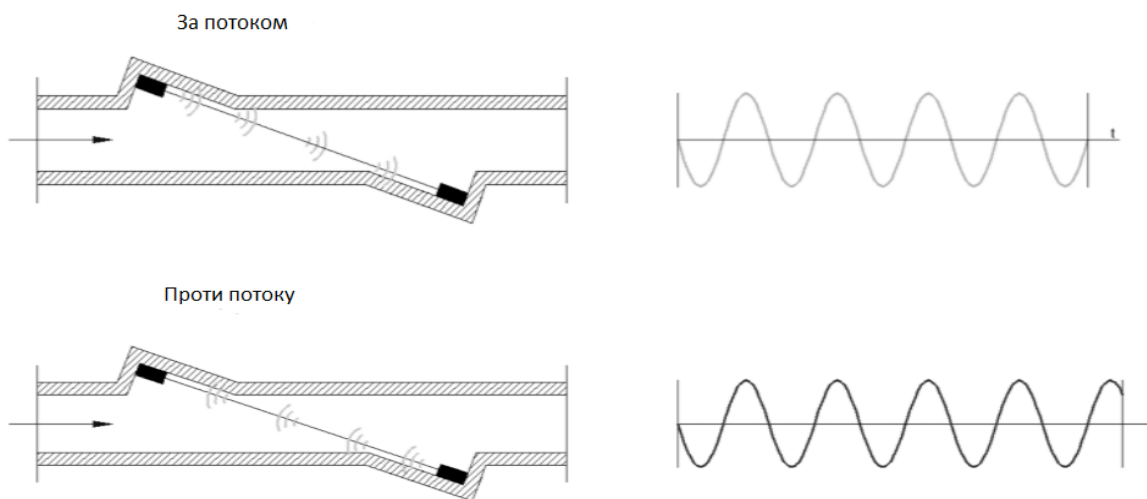


Рис. 6. Фазовий принцип визначення витрати

Частотні ультразвукові витратоміри – працюють на принципі залежності різниці частот повторюваних коротких імпульсів ультразвукових коливань від різниці часів проходження ультразвуковими коливаннями однакового шляху за потоком вимірюваної речовини і проти нього (рис. 7).

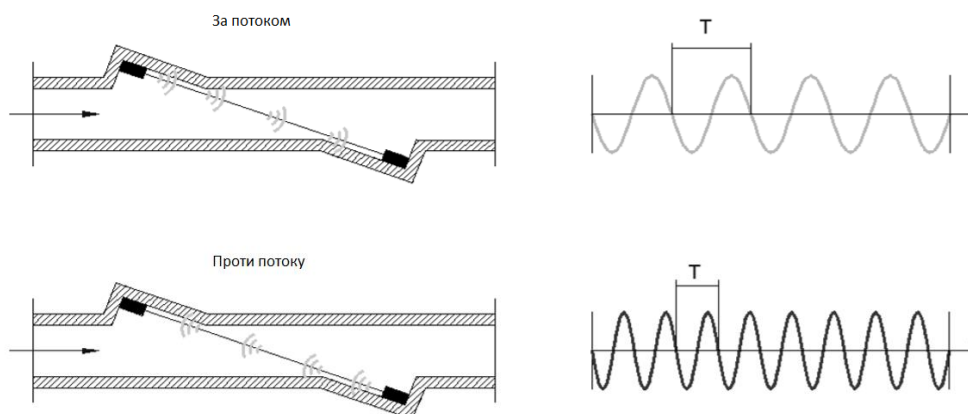


Рис. 7. Частотний принцип визначення витрати

Час-імпульсні ультразвукові витратоміри вимірюють різницю часів проходження коротких імпульсів у напрямку вимірюваного потоку та проти нього на відстані  $L$  (рис. 8).

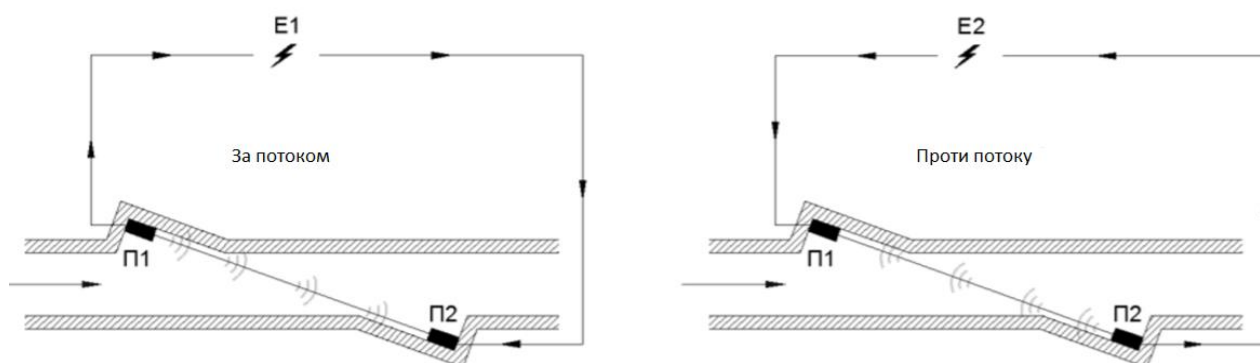


Рис. 8. Час-імпульсний принцип визначення витрати

Допплерівські ультразвукові витратоміри працюють за принципом вимірювання залежної від витрати доплерівської різниці частот, що виникає внаслідок відображення акустичних коливань неоднорідностями потоку.

Ультразвукові витратоміри є найперспективнішими для комерційного обліку, оскільки мають низку переваг [3]:

- 1) відсутність рухомих частин і частин, що виступають у потік;
- 2) відсутність додаткових втрат напору;
- 3) роботу від вбудованого автономного джерела живлення упродовж тривалого часу;
- 4) високу точність;
- 5) високу швидкодію.

Незважаючи на очевидні переваги ультразвукових приладів вимірювання, існують такі недоліки методу [14]:

- 1) обмеження за мінімальною швидкістю потоку;
- 2) складність і висока вартість пристроїв (за інших рівних умов у 3 – 4 рази перевищує вартість тахометричних і електромагнітних витратомірів);
- 3) вплив на покази приладу наявності бульбашок повітря в потоці;

4) швидкість потоку є осередненою уздовж ультразвукового пучка, а не за перерізом трубопроводу.

5) необхідність встановлення значних прямих ділянок трубопроводу до і після перетворювача.

*Приймачі та випромінювачі ультразвуку.* Найважливішим елементом у первинному перетворювачі ультразвукових витратомірів є приймачі та випромінювачі ультразвукових коливань. Їх дія заснована на п'єзоелектричному ефекті, тобто при дії деформуючого зусилля (стиснення/розтягнення) на п'єзоелемент на їх гранях виникає електричний заряд, дане явище називається прямим п'єзоефектом. І навпаки, при подачі на п'єзоелемент електричного заряду, п'єзоелемент буде розтягуватися або стискатися (зворотній п'єзоефект).

Прямий п'єзоефект є основою роботи приймачів, тобто приймач перетворює акустичні коливання в змінну електричну напругу. Зворотній ефект застосовується у випромінювачах, і перетворює змінну електричну напругу в механічні коливання тієї ж частоти.

П'єзоелементи характеризуються цілою низкою характеристик, однією з яких є п'єзоелектричний модуль  $d$  (м/В)

$$d = S/E,$$

де  $S$  – розмір пружної деформації під дією напруги  $E$ .

При зростанні  $d$  ефективність випромінювача збільшується, тобто щоб отримати бажану інтенсивність ультразвукових коливань потрібно прикласти меншу напругу до п'єзоелемента.

Іншою характеристикою є п'єзоконстанта  $h$  (В/м)

$$h = E/S.$$

Залежність між  $h$  і  $d$ :

$$h = (E_{ю}/\epsilon\epsilon_0),$$

де  $E_{ю}$  – модуль Юнга;  $\varepsilon$  – діелектрична проникність;  $\varepsilon_0$  – електрична константа (електрична проникність вільного простору). Отже зі зростанням п'єзомодулю  $d$  зростає і п'єзоконстанта  $h$  [3].

П'єзоелемент, як і будь-яка механічна система, має резонансну або власну частоту коливань

$$f = (1/2a) * (E/q)^{0.5},$$

$$f_p = C/\lambda,$$

де  $a$ ,  $E$ ,  $q$  – товщина, модуль Юнга і густина п'єзоелемента. При резонансній частоті товщина п'єзоелемента  $a$  дорівнює половині довжини хвилі  $\lambda/2$ , тоді швидкість ультразвуку в п'єзоелементі буде рівною

$$c = E/q.$$

Для отримання інтенсивних ультразвукових коливань, потрібно щоб п'єзоелемент працював за резонансної частоти. При забрудненому середовищі високі частоти не прийнятні. Щоб не було розсіювання і поглинання коливань, необхідно, щоб довжина хвилі була на порядок вище діаметра твердих частинок або повітряних бульбашок. Для отримання п'єзоелементу з невеликим значенням частоти  $f$ , порядку сотень або десятків кГц, потрібно застосовувати п'єзокераміку великої товщини або тонку пластинку з металевими накладками з обох боків елементу, щоб загальна товщина дорівнювала половині довжини хвилі. У чистих рідинах навпаки застосовують високі частоти, порядку декількох МГц [3].



## 2.2. Розробка структурної схеми

Принцип дії первинного перетворювача витрати базується на визначенні різниці часів проходження звукового сигналу відстані від випромінювача до приймача за потоком і проти нього.

Обробка отриманих сигналів за алгоритмом, дозволяє отримати інформацію про швидкість потоку, і, за певних умов, – про витрату [14].

Масовий ультразвуковий витратомір конструктивно складається з двох п'єзоелектричних перетворювачів, мікроконтролера, блоку формування зондувальних імпульсів, комутатора, сенсора температури, підсилювача детектованих імпульсів, індикатора (рис. 9).

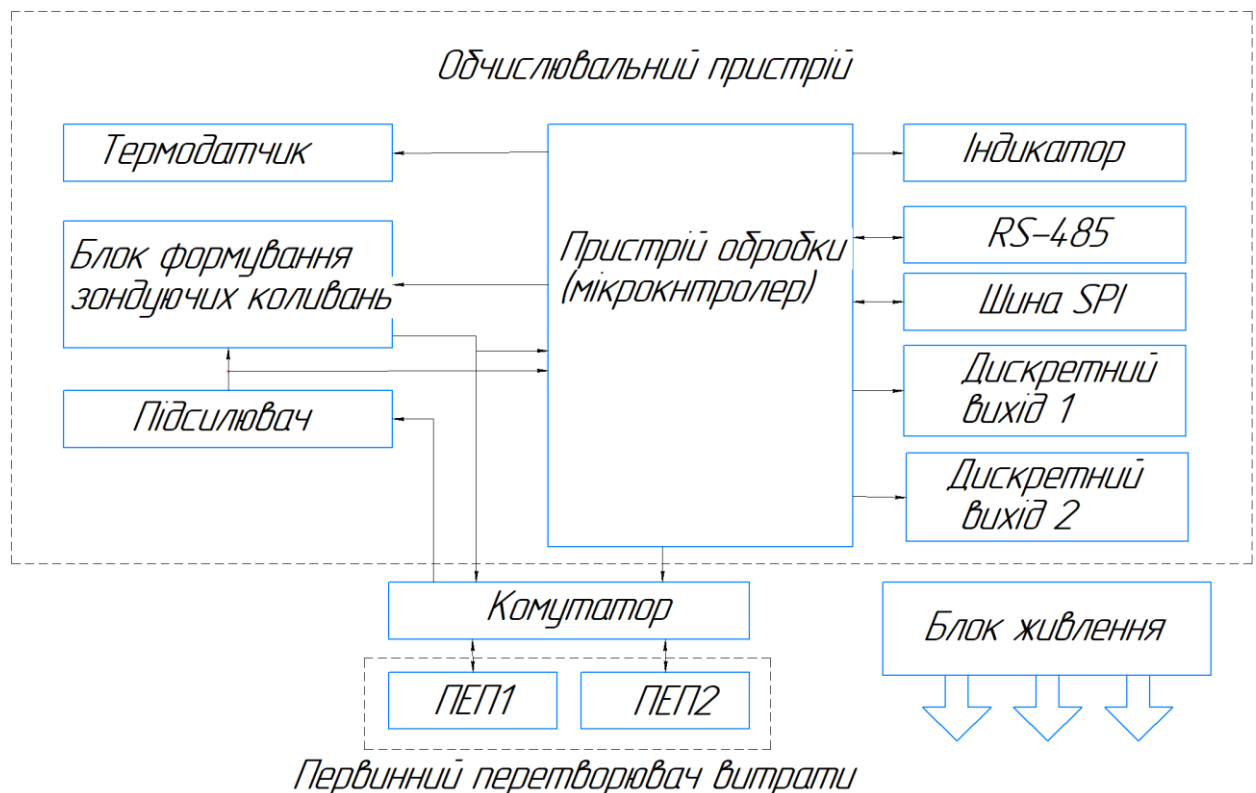


Рис. 9. Структурна схема масового витратоміра: ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач

Ядром схеми є контролер, до якого приєднуються блок формування зондувальних імпульсів, комутатор, сенсор температури, підсилювач

детектованих імпульсів, індикатор, а також допоміжні пристрої, що забезпечують можливості зв'язків із зовнішніми пристроями, і універсальний інтерфейс RS-485. Обмін даними між елементами та мікроконтролером реалізовано за допомогою інтерфейсу SPI. Даний інтерфейс використовується для управління і налаштування. Обов'язкове підключення кварцового генератора, оскільки внутрішній генератор будь-якого мікроконтролера менш стабільний, ніж зовнішній кварцовий і може суттєво вплинути на точність вимірювання часів проходження ультразвукового імпульсу за потоком і проти нього. Блок живлення з'єднаний з усіма функціональними вузлами і забезпечує загальну працездатність, формуючи напруги 3,3 В, 5В і 25В.

*Блок живлення* – пристрій, завданням якого є перетворення мережевої змінної напруги в постійну і подача її до компонентів витратоміра (мікроконтролеру та всім елементам, що до нього підключені).

Даний блок має забезпечувати напруги  $\pm 3,3$  В,  $+ 5$  В для живлення електронних компонентів схеми і  $+ 25$  В для живлення п'єзоелектричних перетворювачів.

*Мікроконтролер* є головним електронним компонентом схеми, який представляє собою функціонально закінчену велику електронну схему, містить в собі всі необхідні вузли для елементів програмованого на командному рівні обчислювального процесу: центральний процесор (ЦП), оперативно-запам'ятовуючий пристрій (ОЗП), постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП), багатоканальний інтерфейс введення-виведення, тактовий генератор з можливістю зовнішньої синхронізації, блок керування і синхронізації, внутрішні двонаправлені шини обміну даних.

Мікроконтролер відрізняється від класичної мікроЕОМ наявністю додаткових пристроїв сполучення з конкретним об'єктом керування або контролю. Це можуть бути АЦП, ЦАП, ключі, різні погоджувальні пристрої та інша ефективна периферія для прямого цифрового керування об'єктом.

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір мікроЕОМ або мікроконтролера визначається в основному достатністю ОЗУ, ПЗУ і швидкодії, а також наявністю внутрішніх і можливістю підключення зовнішніх периферійних пристроїв.

Аналіз показав, що для побудови масового витратоміра можливе застосування різних за потужністю контролерів [14]. Так при розробці приладів без функцій накопичення результатів вимірювання (збір і зберігання даних здійснюється засобами ПК) можливе застосування досить простих і дешевих приладів з тактовою частотою, що не перевищує 16 МГц, з ОЗУ - 128 байт, ПЗУ - 2кб.

*Індикатор.* Компактність виконання і вимоги найнижчого рівня споживання електроенергії обумовлюють необхідність застосування рідкокристалічних індикаторів (РКІ). Одним з важливих недоліків РКІ є погана видимість в темний час доби, і ненадійність роботи за низьких температур, тому бажано вибирати індикатор з внутрішньою підсвіткою і розширеним температурним діапазоном. Для розроблюваного приладу підійде індикатор з роздільною здатністю 64х32 точки і внутрішнім мікроконтролером.

*Дискретний вихід* – контакт, здатний видавати сигнал, який є з точки зору програми логічним нулем або одиницею. Такий сигнал здатний замкнути або розімкнути коло керування або живлення підключеного пристрою, тим самим виконати необхідні алгоритми роботи.

Зовнішні зв'язки витратоміра забезпечуються за допомогою наявних дискретних виходів і послідовного інтерфейсу RS-485.

*Шина SPI* - послідовний периферійний інтерфейс (SPI) – синхронний протокол послідовної передачі даних, який використовується для зв'язку мікроконтролера з одним або декількома периферійними пристроями. Інтерфейс SPI відрізняється відносно високою швидкістю і призначений для зв'язку близько розташованих пристроїв. Він також може використовуватися для взаємодії двох мікроконтролерів. Згідно з протоколом SPI, один з

взаємодіючих пристроїв (зазвичай мікроконтролер) завжди є головним і контролює ведені периферійні пристрої [15].

*Інтерфейс RS-485* використовується для обміну даними між декількома пристроями по одній дводротовій лінії зв'язку (витій парі) в напівдуплексному режимі. Передача виконується одночасно тільки в один бік. Прийом при цьому неможливий. Для прийому даних потрібно перемикання приймача в режим прийому.

*Сенсори температури* – можливе застосування, як терморезисторів, так і інших спеціалізованих пристроїв. Останнім часом з'явилися інтелектуальні сенсори, які мають вбудований мікропроцесор, що дозволяє здійснювати не тільки попередню обробку сигналу, але і забезпечувати двосторонній обмін інформацією із зовнішньою ЕОМ або мікропроцесором, що дозволяє без додаткових перетворень передавати інформацію про температуру досліджуваної рідини в центральний мікроконтролер.

Схема працює так. За командою мікроконтролера, подається сигнал на блок формування зондуючих коливань та через комутатор надходить на п'єзоелектричний перетворювач. Ультразвуковий імпульс проходить крізь рідину і через час  $t_1$  уловлюється датчиком іншого п'єзоелектричного перетворювача. Електричний сигнал з перетворювача посилюється підсилювачем і надходить на вхід мікроконтролера. Там утворюється число, пропорційне значенню часу  $t_1$ , яке запам'ятовується обчислювальним пристроєм. Аналогічна ситуація відбувається і з іншим п'єзоелектричним перетворювачем та визначається  $t_2$ .

З сенсора температури інформація про температуру рідини надходить на обчислювальний пристрій.

Далі, обчисленні значення  $G_m$ ,  $\rho$ ,  $\eta_k$  можуть бути відображенні на індикаторному пристрої.

### 2.3. Розробка принципової схеми

Схема розробленого ультразвукового перетворювача зображена на рис.10

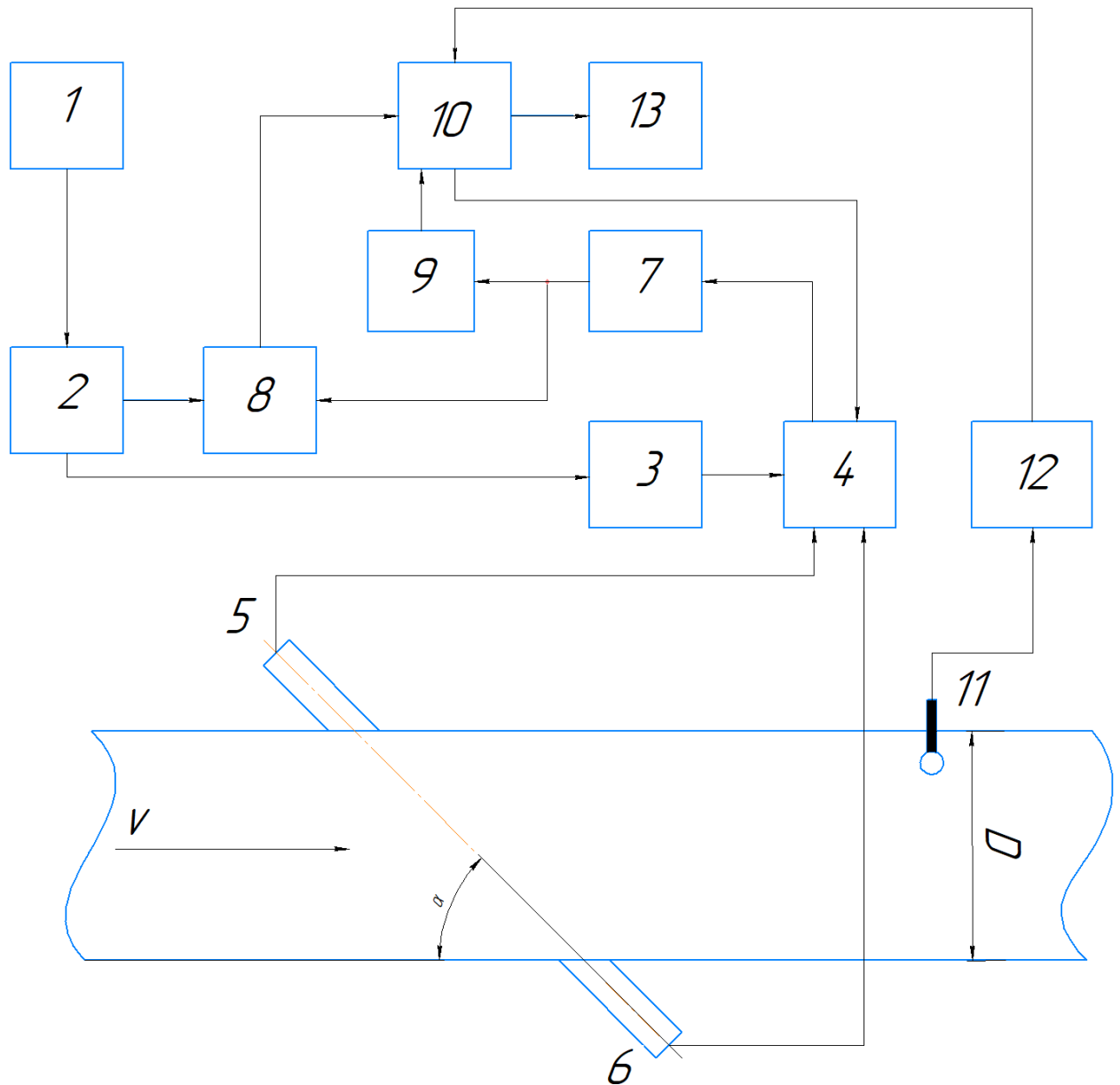


Рис. 10. Принципова схема ультразвукового масового витратоміра: 1 – генератор; 2 – ділник частоти; 3 - формувач зондуючих коливань; 4 - комутатор; 5,6 – п’єзоелектричний перетворювач; 7 – підсилювач; 8 – фазовий детектор; 9 – пристрій вимірювання поглинання звуку; 10 – обчислювальний пристрій; 11 – сенсор температури; 12 – нормуючий підсилювач; 13 – індикатор.

### 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Якщо площини акустичних перетворювачів, що випромінюють і приймають розташовані під деяким кутом  $\theta$  до осі труби, то звукові коливання проходять в вимірюваній рідині шлях довжиною  $L$  під кутом  $\alpha$ , рівний  $\alpha = 90^\circ - \theta$ . Позначимо через  $v_L$  швидкість потоку, усереднену по довжині  $L$ . Проекція швидкості  $v_L$  на напрям  $L$  буде дорівнювати  $v_L \cdot \cos \alpha$ . Якщо акустичні коливання спрямовані в бік руху потоку, то час  $\tau_1$  проходження ними відстані  $L$  визначається виразом

$$\tau_1 = L / (c + v_L \times \cos \alpha), \quad (1)$$

де  $c$  - швидкість поширення акустичних коливань в нерухомій рідині.

При зворотному напрямку акустичних коливань  $\tau_2$  проходження ними тієї ж відстані визначиться виразом [14]

$$\tau_2 = L / (c - v_L \times \cos \alpha). \quad (2)$$

Визначимо різницю (1.2) і (1.1):

$$\Delta \tau = \tau_2 - \tau_1 = \frac{2L}{c^2} \frac{v_L \cos \alpha}{1 - (v_L \cos \alpha / c)^2}.$$

Визначимо різницю  $\tau_1$  і  $\tau_2$ :

$$\Delta \tau = \frac{2Lv_L \cos \alpha}{c^2} \quad (3)$$

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Виразимо швидкість потоку вимірюваного середовища:

$$v_L = \frac{\Delta \tau \cdot c^2}{2 \cdot L \cdot \cos \alpha} \quad (4)$$

Тоді залежність об'ємної витрати та різницею тривалістю розповсюдження звукової хвилі за та проти течії за формулою:

$$Q_v = \frac{\Delta \tau \cdot c^2}{2 \cdot L \cdot v_L} \cdot S \quad (6)$$

Обчислення густини рідини  $\rho$  відбувається за формулою

$$\rho = c \sqrt{K_\beta}, \quad (7)$$

де  $K_\beta$  - коефіцієнт зв'язку між густиною і стисненням, що залежить від температури рідини.

Масова витрата рідини  $G_M$  визначається як добуток швидкості рідини, площі перерізу трубопроводу та густини рідини

$$G_M = Q_v \cdot \rho \quad (8)$$

$$\Delta \tau = \frac{2 \cdot L \cdot v_L}{S \cdot c^2} \cdot Q_v \quad (9)$$

## 4. РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

### 4.1. Статична характеристика

Статична характеристика – це залежність вхідного сигналу від вихідного в статичному режимі роботи приладу. В нашому випадку це залежність масової витрати від швидкості потоку.

Оскільки швидкість розповсюдження ультразвуку в рідині  $c$  та коефіцієнт адіабатного розширення  $K_\beta$  залежать від температури та тиску, приймемо дані значення відповідно  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$  та  $P = 101325\text{ Па}$ .

Таблиця 4 - Вихідні дані:

D – діаметр трубопроводу, м	0,05
$Q_{\min}$ – мінімальна витрата, кг/с	250
$Q_{\max}$ – максимальна витрата, кг/с	35000
$c$ , швидкість розповсюдження ультразвуку в рідині, м/с	1483
$K_\beta$ – коефіцієнт адіабатного стиснення рідини	0,453
T, температура вимірюваного середовища, $^\circ\text{C}$	20
P, тиск в вимірюваному середовищі, Па	101325

Визначимо залежність між об'ємною витратою та різницею тривалостей розповсюдження звукової хвилі за та проти течії за формулою (9), де  $S = \pi r^2 = 0,001963\text{ м}^2$  – площа живого перерізу (рис. 11).



Таблиця 5 - Залежність між об'ємною витратою та різницею часу розповсюдження звукової хвилі за та проти течії

Q, м³/год	Δt, с
0,25	8,14045E-09
5	1,62809E-07
10	3,25618E-07
15	4,88427E-07
20	6,51236E-07
25	8,14046E-07
30	9,76855E-07
35	1,13966E-06

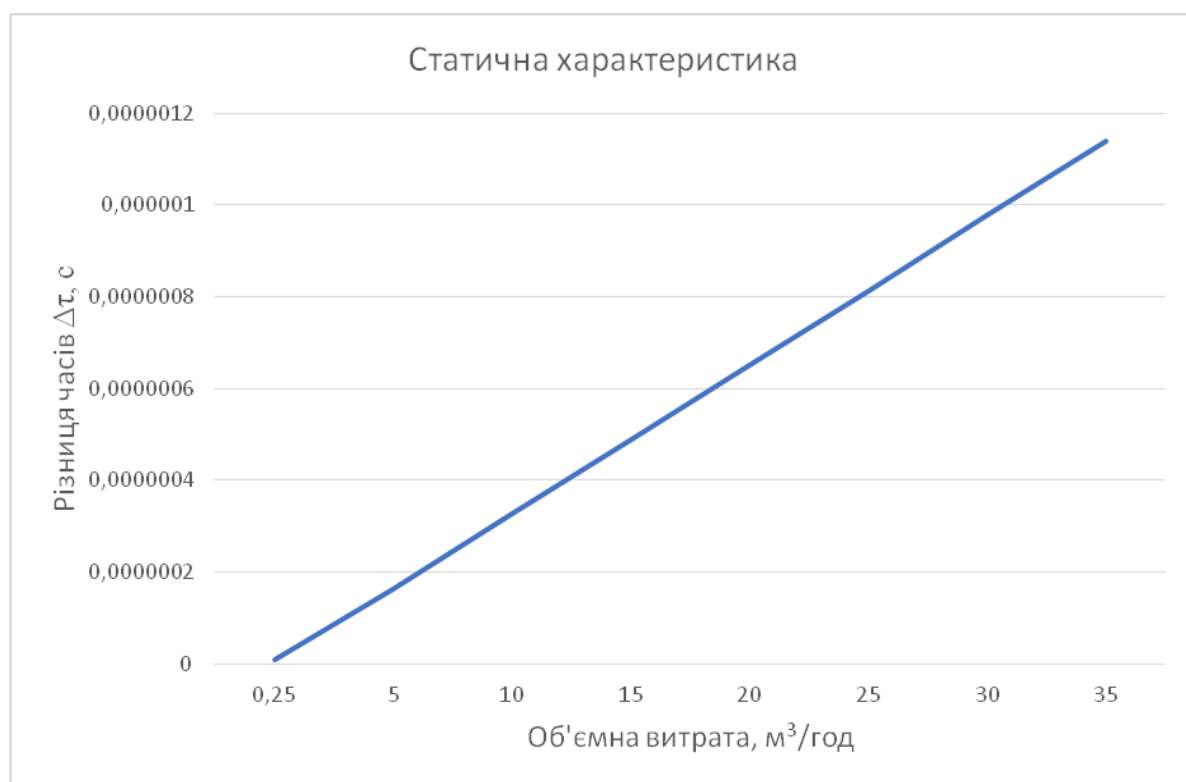


Рис. 11. Графік статичної характеристики

Обчислення густини рідини  $\rho$  відбувається за формулою (7)

$$\rho = 1483 * \sqrt{0,453} = 998,13,$$

де  $K_\beta$  - коефіцієнт зв'язку між густиною і стисненням, що залежить від температури рідини.

За формулою (8) розрахуємо залежність між масовою витратою та різницею часів розповсюдження звукової хвилі за та проти течії

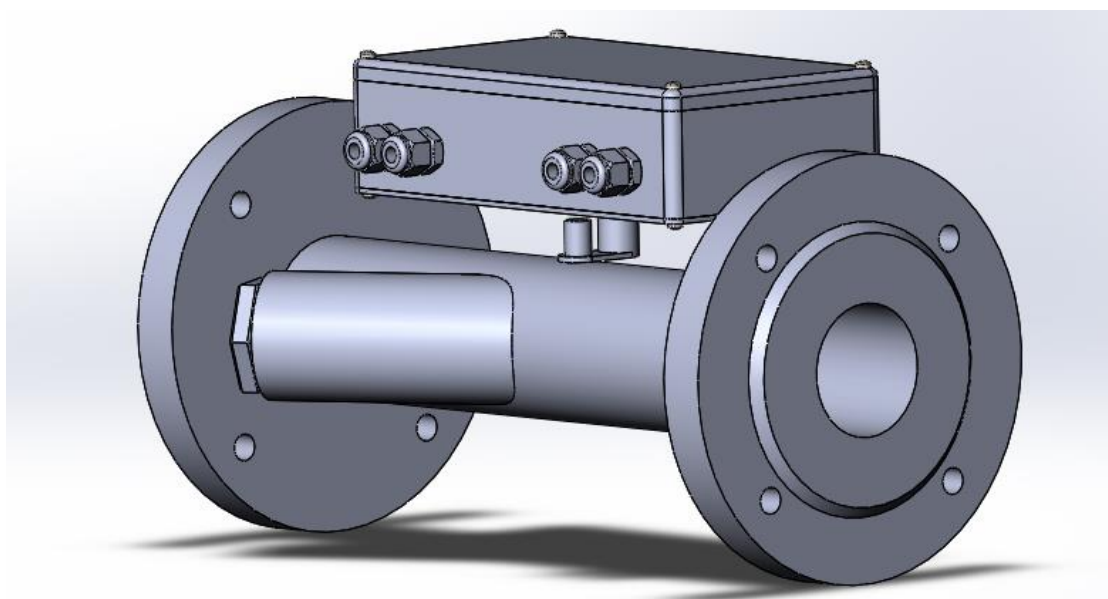


Рис. 12. Графік залежності між масовою витратою та різницею

## ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1. ОПИС ВИБРАНОГО ПРИЛАДУ

Масовий ультразвуковий витратомір призначений для вимірювання густини потоку і об'ємної витрати, а також обчислення масової витрати за допомогою обчислювального блоку. Принцип роботи ультразвукових витратомірів заснований на вимірюванні різниці часу проходження коротких імпульсів у напрямку вимірюваного потоку та проти нього на відстані  $L$ . Різниця часів проходження ультразвуковими імпульсами відстані між випромінювачем і приймачем по потоку і проти потоку пропорційна швидкості потоку, отже пропорційна витраті. Чутливим елементом перетворювача є два п'єзоелектричних перетворювача. Їх дія заснована на п'єзоелектричному ефекті. Основою конструкції є корпус по обидва боки якого знаходяться отвори для приєднання витратоміра в трубопровід. Всередині трубопроводу знаходяться два п'єзоелектричні перетворювачі, які вгвинчуються в корпус. До верхньої частини корпусу приєднується обчислювальний пристрій за допомогою гайки. Габаритні розміри: довжина – 320 мм, висота – 182 мм; ширина – 162 мм (рис. 13).



					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Рис. 13. Масовий ультразвуковий витратомір. 3D модель

## 2. ПОБУДОВА СХЕМИ СКЛАДАЛЬНОГО СКЛАДУ

На основі проведеного аналізу конструкторської документації розробляється схема складального складу (рис. 14). Вона ілюструє побудову приладу або складальної одиниці, та показує кількість складальних одиниць, їх найменування, кількість необхідних деталей та взаємозв'язок між ними. Дана схема використовується як комплектуюча карта при складанні приладу. Мінусом схеми є те, що вона не відображує порядку складання, не вказує, з чого починати складання і в якій послідовності його вести. Складальні одиниці та деталі представляють собою прямокутники, в яких показано номер деталі або складальної одиниці, найменування та кількість.

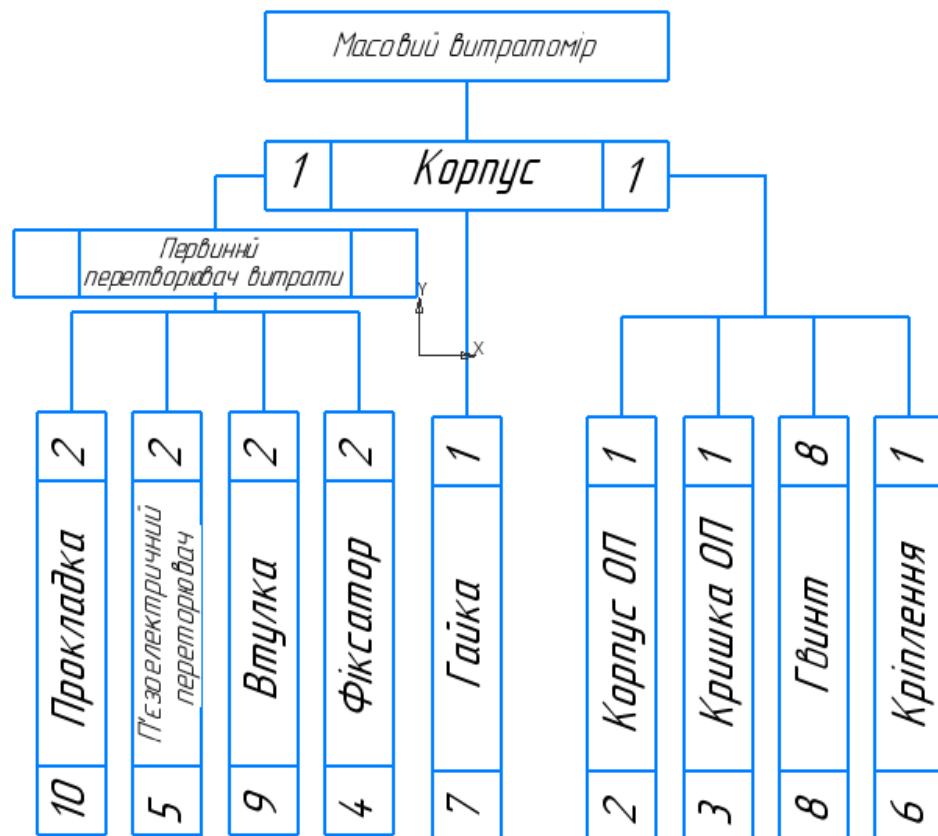


Рис. 14. Схема складального складу витратоміра

### 3. ПОБУДОВА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ СКЛАДАННЯ

Технологічна схема складання (рис. 15) розробляється для повного уявлення проходження процесу складання приладу і є основним документом, який фіксує технологічний процес складання. В ній показано послідовність складання, засоби забезпечення з'єднань, періодичність та зміст процесів регулювання, випробування та контролю.

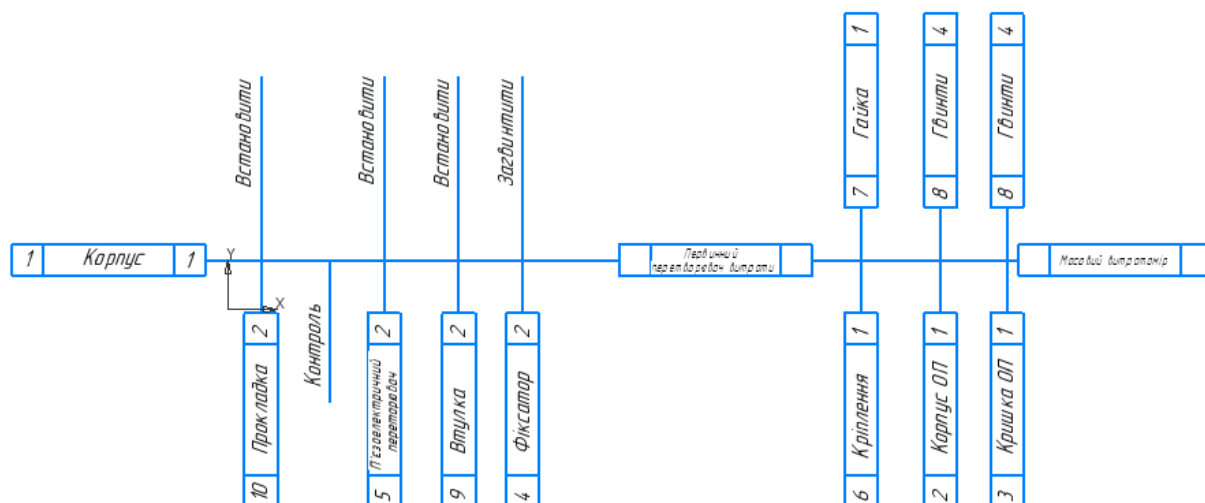


Рис. 15. Технологічна схема складання

#### 4. ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ПРИЛАДУ

Технологічності виробу при складанні характеризується простотою складання виробу загалом та складальних одиниць без пригонок та доробок.

Абсолютний техніко-економічний показник трудомісткості виготовлення  $T_v$  виражається сумою нормо-годин, витрачених на підготовку виробу:

$$T_v = \sum T_i ,$$

де  $T_i$  – трудомісткість виготовлення та випробувань  $i$ -ї складової частини виробу в нормо-годинах.

Рівень технологічності конструкції по трудомісткості виготовлення  $K_{p.t}$  визначається як відношення досягнутої трудомісткості виробу  $T_v = 32$  нормо-годин до базового показника трудомісткості виготовлення  $T_{б.в} = 35,5$  нормо-годин.

$$K_{p.t} = T_v / T_{б.в} = 0,9$$

Попередній розрахунок  $K_{p.t}$  в процесі проектування виробу можна робити по наближеним розрахункам трудомісткості виготовлення основних складових частин, використовуючи дослідно-статистичні дані по виробках-представниках і коригувальні коефіцієнти.

Технологічна собівартість виробу  $C_t$  визначається як сума витрат на одиницю виробу:

$$C_t = C_m + C_z + C_{ц.в} = 15000 + 1300 + 200 = 16500 \text{ грн,}$$

де  $C_m = 13500$  грн – вартість матеріалів, витрачених на виготовлення виробу;

$C_z = 1100$  грн – заробітна платня виробничих робітників з нарахуваннями;

$C_{ц.в} = 250$  грн – цехові витрати, що включають у себе витрати на електроенергію, споживану устаткуванням, на ремонт та амортизацію

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

устаткування, інструмента і пристосувань, на мастильні, охолоджуючі, обтиральні та інші матеріали, передбачені процесом виробництва виробу.

Рівень технологічності конструкції по технологічній собівартості визначається як відношення досягнутої собівартості виробу  $C_T$  до технологічної собівартості базового виробу  $C_{б.т} = 16500$  грн

$$K_{p.c} = C_T / C_{б.т} = 0,9.$$

Попередній розрахунок  $K_{p.c}$  в процесі проектування виробу можна робити по наближеним розрахункам технологічної собівартості основних складових частин, використовуючи дослідно-статистичні дані по виробках-представниках та коригувальні коефіцієнти.

Таблиця 7 – Уніфікація деталей приладу

№	Назва деталі	Кількість деталей	Уніфікація
1	Корпус	1	н/уніфік.
2	Корпус ОП	1	н/уніфік.
3	Кришка ОП	1	н/уніфік.
4	Фіксатор	2	н/уніфік.
5	П'єзоелектричний перетворювач	2	н/уніфік.
6	Кріплення	1	н/уніфік.
7	Гайка М10 ГОСТ5927-70	1	уніфік.
8	Гвинт М3 ГОСТ1491-80	8	уніфік.
9	Втулка ГОСТ 18433-73	2	уніфік.
10	Прокладка ГОСТ 15180-86	2	уніфік.

Таблиця 8 – Уніфікація використаних операцій

№	Назва операції	Уніфікація
1	Встановити	н/уніфік.
2	Загвинтити	Уніфік.

*Коефіцієнт складності конструкції*  $K_{ск}$  враховує ступінь розчленованості усієї конструкції виробу на складальні одиниці і деталі і визначається як

$$K_{ск} = \frac{N}{n}$$

де  $N$  – загальна кількість складальних одиниць у виробі,  $n$  – загальна кількість деталей.

При  $K_{ск} < 0.2$ , то технологічність виробу низька, при  $0.2 < K_{ск} < 0.4$  – задовільна, при  $K_{ск} > 0.4$  – добра. Для заданого приладу задовільна.

$$K_{ск} = \frac{3}{10} = 0.3$$

*Коефіцієнт уніфікації виробу*

$$K_y = \frac{N_y + n_y}{N + n} = \frac{0 + 4}{3 + 13} = 0.3,$$

де  $N_y = 0$  – кількість уніфікованих складальних одиниць;

$n_y = 4$  – кількість уніфікованих деталей;

$N = 3$  – кількість усіх складальних одиниць;

$n = 10$  – кількість усіх деталей

При  $K_y < 0.25$ , то технологічність виробу низька, при  $0.25 < K_y < 0.6$  – задовільна, при  $K_y > 0.5$  – добра. Для заданого приладу задовільна.

*Коефіцієнт уніфікації складальних одиниць*  $K_{уск}$  визначається як відношення кількості уніфікованих складальних одиниць до їхнього загального числа

$$K_{уск} = \frac{N_y}{N} = \frac{0}{3} = 0.$$

При  $K_{у.с} < 0.2$ , то технологічність виробу низька, при  $0.2 < K_{у.с} < 0.4$  – задовільна, при  $K_{у.с} > 0.4$  – добра. Для заданого приладу низька.

*Коефіцієнт уніфікації деталей*  $K_{уд}$

$$K_{уд} = \frac{n_y}{n} = \frac{4}{10} = 0.4.$$

					ДП ПМ6102.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44



При  $K_{уд} < 0.3$ , то технологічність виробу низька, при  $0.3 < K_{уд} < 0.6$  – задовільна, при  $K_{уд} > 0.6$  – добра. Для заданого приладу задовільна.

#### *Комплексного показника технологічності виробу*

Комплексні показники технологічності конструкції характеризують визначену групу ознак технологічності конструкції виробу.

Технологічність конструкції виробу може характеризуватися одним комплексним показником чи декількома, що узагальнюють групи часткових показників чи виражають різні види технологічності конструкції виробу.

Для визначення комплексних показників потрібно враховувати різну економічну ефективність вхідних часткових показників шляхом введення коефіцієнтів економічної ефективності  $K_e$  часткових показників технологічності конструкції виробу. Цей коефіцієнт доцільно обмежувати межами  $0 < K_e < 1$ .

Технологічність конструкції виробу оцінюється основними та допоміжними показниками з урахуванням коефіцієнтів економічної ефективності  $K_e$ . Коефіцієнт економічної ефективності визначаються з умов:

$$\sum_{i=1}^n K_{ei} = 1.$$

Комплексний показник технологічності розраховується за формулою:

$$K = \frac{K_1 \cdot K_{1e} + K_2 \cdot K_{2e} + K_3 \cdot K_{3e} + \dots + K_n K_{ne}}{K_{1e} + K_{2e} + K_{3e} + \dots + K_{ne}},$$

де

$$K_1 = K_{рт} = 0,9;$$

$$K_2 = K_{рс} = 0,9;$$

$$K_3 = K_y = 0,3;$$

$$K_4 = K_{уск} = 0;$$

$$K_5 = K_{уд} = 0,4;$$

$$K_6 = K_{ск} = 0,3;$$

$$K = \frac{0,9 \cdot 0,26 + 0,9 \cdot 0,26 + 0,3 \cdot 0,12 + 0 \cdot 0,12 + 0,4 \cdot 0,12 + 0,3 \cdot 0,12}{0,26 + 0,26 + 0,12 + 0,12 + 0,12 + 0,12} = 0,588$$

З результатів проведеного аналізу конструкції приладу, можна зробити висновок, що загальна технологічність виробу задовільна, але деякі показники є низькими, що може вплинути на виробництво та час виготовлення приладу.

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 5. РОЗРАХУНОК РОЗМІРНОГО ЛАНЦЮГА

До конструкції пред'являються певні вимоги по точності показань або на вихідні параметри за заданих умов експлуатації. При цьому повинна забезпечуватися надійність роботи приладу та необхідний термін його роботи. Всі ці вимоги забезпечуються правильним і обґрунтованим вибором принципової схеми приладу та його конструкції, а також технологією виготовлення деталей і складання приладу. Однією з основних умов технологічності конструкції приладу при виконанні його складання в серійному і масовому виробництві є взаємозамінність складальних одиниць і деталей. Нехай при складанні витратоміра (рис. 16) необхідно забезпечити зазор між вторинним перетворювачем та з'єднувальним корпусом. Ця вимога повинна бути забезпечена в умовах серійного виробництва за рахунок постановки економічно виправданих допусків на деталі витратоміра. Схема розмірного ланцюга показана на рис. 17.

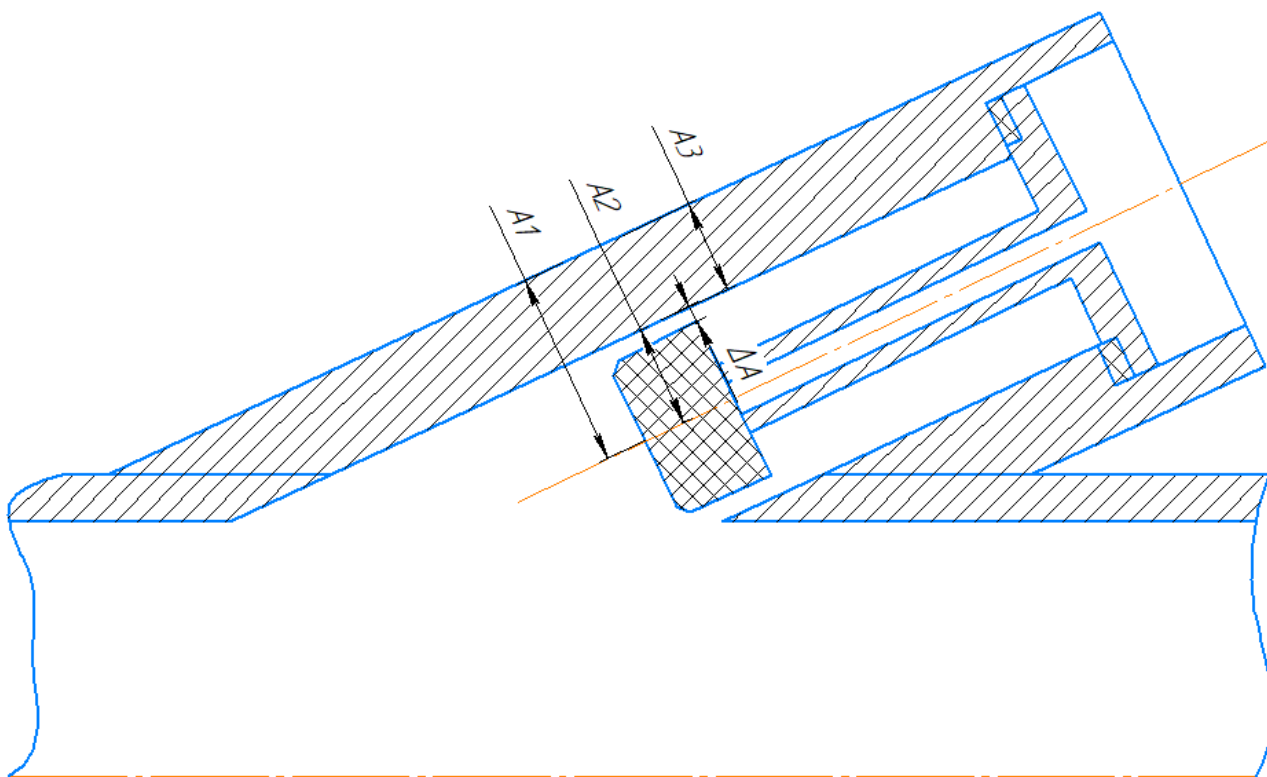


Рис. 16. Розмірний ланцюг витратоміра

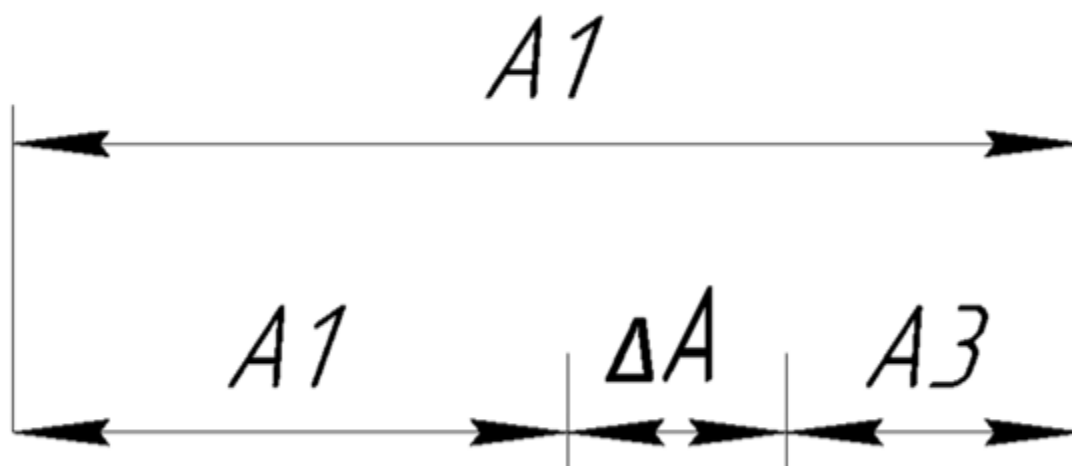


Рис. 17. Схема розмірного ланцюга

У таблиці 9 наведено номінальні значення ланок розмірного ланцюга та їх допустимі відхилення.

Таблиця 9 - Номінальні значення ланок розмірного ланцюга та їх допустимі відхилення.

Ланка	Номінальний розмір, мм	Допуск, мм	Кординати середини допуску	Тип ланки
A1	25	-0,021	-0,01	Збільшуюча
A2	10	+0,018	0,009	Зменшуюча
A3	12	+0,018	0,009	Зменшуюча

Розрахуємо номінальний розмір і допуск замикаючої посадки. Так як всі ланки паралельні, то номінальний розмір розраховується за формулою:

$$\Delta A = A1 - (A2 + A3) = 25 - (10 + 12) = 3 \text{ мм.}$$

Розрахуємо допуск на розмір замикаючої ланки:

$$\delta_{\text{зам}} = \sum_{i=1}^3 |\delta_i| = (0,021 + 0,010 + 0,012) = 0,043 \text{ мм.}$$

Кордината середини поля допуску замикаючої ланки обчислюється як:

$$K_{\text{зам}} = K_1 - (K_2 + K_3) = -0,01 - 0,09 - 0,09 = -0,028.$$

Верхнє та нижнє відхилення розміру замикаючої ланки:

					ДП ПМ6102.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

$$BV_{\text{зам}} = K_{\text{зам}} + 0,5 \cdot \delta_{\text{зам}} = -0,028 + 0,5 \cdot 0,043 = 0,0495 \text{ мм};$$

$$HB_{\text{зам}} = K_{\text{зам}} - 0,5 \cdot \delta_{\text{зам}} = -0,028 - 0,5 \cdot 0,043 = 0,0065 \text{ мм};$$

Таким чином, при повній взаємозамінності замикаюча ланка має такий вигляд:

$$A_{\text{зам}} = \left( 3 \begin{smallmatrix} +0,0065 \\ -0,0495 \end{smallmatrix} \right) \text{ мм}$$

## 6. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ ПРИБАДУ

Проектування технологічного процесу складання включає вибір найбільш раціональних процесів і способів складання, визначення послідовності з'єднання деталей і складальних одиниць, регулювання і контролю виробу та складальних одиниць, вибір необхідного устаткування, робочих і вимірювальних інструментів та нормування операцій технологічного процесу.

При цьому треба передбачати всі заходи з забезпечення заданої програми випуску виробів, що повністю відповідають технічним вимогам, скорочення трудомісткості, тривалості циклу складання і зниження вартості виробу.

Загальні правила розробки технологічного процесу регламентовані ГОСТ 14.301-73.

Аналізуючи об'єкт складання необхідно звернути увагу на наступні особливості:

- ступінь розчленування виробу;
- характер з'єднання окремих деталей.

Необхідність розчленування приладу на окремі складальні одиниці визначається в першу чергу умовами роботи та експлуатації, можливістю виготовлення і з'єднання деталей.

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Розчленування виробу на складальні одиниці може проводитися і з технологічних міркувань – кількість складальних одиниць в приладі, визначає можливість скорочення трудомісткості і тривалості (циклу) складання за рахунок створення умов для виконання складальних операцій, розділення процесу складання на паралельні потоки, автоматизації і механізації процесу.

Після такого аналізу приладу проводиться розробка послідовності складання, послідовності і змісту кожної операції, оформлення технологічної документації.

Проектування технологічного процесу складання складається з наступних етапів:

- на основі аналізу конструкторської документації розробляється схема складального складу і технологічна схема складання;
- визначається організаційна форма складання з урахуванням конструктивних особливостей виробу, річної програми випуску, умов взаємозамінності тощо;
- виконується вибір методу складання виходячи з вимог взаємозамінності і прийнятою організаційною формою складання;
- розробляється технологічний маршрут складання;
- вибирається обладнання робочих місць в відповідності до призначених складальних операцій;
- підбирається універсальна та проектується спеціальна технологічна оснастка;
- для виконання складальних операцій підбираються допоміжні матеріали (припій, флюс, клей тощо);
- проводиться нормування та визначається розряд роботи для кожної операції [3].

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У даному дипломному проєкті бакалавра проведено огляд і аналіз існуючих масових витратомірів, виявлено їх переваги та недоліки, розроблено схему вимірювання масової витрати на основі час-імпульсного ультразвукового методу вимірювання витрати і ультразвукового вимірювача частоти, розглянуто математичну модель процесу вимірювання витрати, визначено статичну характеристику приладу.

У технологічному розділі було проведено опис створюваного приладу, побудовано схему складального складу та схему технологічного складання, проведено оцінку технологічності приладу, розраховано розмірний ланцюг та розроблено технологічний процес складання приладу. Оцінка технологічності приладу дала задовільні результати за коефіцієнтом уніфікації виробу, коефіцієнтом уніфікації деталей, коефіцієнтом складності конструкції та комплексним показником технологічності. За коефіцієнтом уніфікації складальних одиниць отримано низькі результати.

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кивилис С.С. Плотномеры М.: Энергия, 1980. — 278 с.
2. Жуков Ю. П. Вибрационные плотномеры. – М.: Энергоавтомиздат, 1991. – 144 с.: Ил.
3. Кремлевский П. П., Расходомеры и счетчики количества: Справочник. – 4е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
4. Вильнер Я.М., Ковалев Я.Т., Некрасов Б.Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. Под ред. Б. Б. Некрасова. Минск, Вышэйшая школа, 1976. - 416 с.
5. Хансуваров К. И., Цейтлин В. Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: Учебное пособие. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 287 с.
6. Силовые расходомеры. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://npopramen.ru/information/other-flowmeters/flowmeters-with-moving-body/7-power-flowmeters>
7. Тепловий витратомір. [Электронний ресурс]. Доступно: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Тепловий\\_витратомір](https://uk.wikipedia.org/wiki/Тепловий_витратомір)
8. Парциальные расходомеры. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://npopramen.ru/information/other-flowmeters/43-hydrodynamic-methods/4-partial-flowmeters>
9. ГБОУ СПО "Салаватский индустриальный колледж" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://salinc.ru:65082/si/DD.html>
10. Наумчик И.В., Кинжагулов И.Ю., Крень А.П., Степанова К.А. Массовый расходомер жидкостей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 5. С. 900–906.
11. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Иностранная литература, 1957. 726 с.

					<i>ДП ПМ6102.000.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52



12. Полупан А.В., Наумчик И.В., Светлорусов М.А. Определение скорости звука в азотном тетраоксиде и водных растворах перекиси водорода // Контроль. Диагностика. 2011. № 2. С. 40–43.
13. Ультразвуковой метод измерения расхода. [Электронный ресурс].  
Доступно: <https://eno-tek.ru/blog/teplo-blog/ultrasonic-method>
14. Биргер Г.И., Бражников Н.И. Ультразвуковые расходомеры. Монография. — Москва: Металлургия, 1964. — 382 с.
15. Вільна енциклопедія «Вікіпедія» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface](https://uk.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface).
16. Дипломний проект бакалавра: організація, вимоги до структури, змісту та оформлення [Текст]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування приладів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського: уклад.: О. К. Нікітін, В. М. Зайцев. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 173 с.

Додатки

[illegible]

Перш. Застосування	Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка		
Справ. №	A1			ДП ПМ6102.000.100 СК	Складальне креслення				
	A4	2		ДП ПМ6102.000.102	Електроелектричний перетворювач				
	A3	1		ДП ПМ6102.000.1001	Корпус	1			
	A4	3		ДП ПМ6102.000.103	Фіксатор	2			
Підп. і дата									
Інв. № дубл.									
Взаєм. інв. №									
Підп. і дата									
Інв. № подл	Ізм	Лист	№ докум	Підп.	Дата				
	Разраб.	Васильюк							
	Пров.	Писарець							
	Н.контр								
	Затв.								
ДП ПМ6102.000.100 СК						Літ.		Лист	Листів
Ультразвуковий витратомір Складальний кресленик									1
						ПБФ, КПІ			

Перш. Застосування	Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка		
Справ. №	A2			ДП ПМ6102.000.200 СК	Складальне креслення				
					<b><u>Документація</u></b>				
					<b><u>Деталі</u></b>				
	A3		1	ДП ПМ6102.000.201	Корпус ОП	1			
	A4		2	ДП ПМ6102.000.202	Кришка ОП	1			
					<b><u>Покупні вироби</u></b>				
			3		Роз'єм	4			
Підп. і дата					<b><u>Стандартні вироби</u></b>				
			4		Гвинт М3	8			
					ДСТУ ГОСТ 1491-80				
Інв. № дубл.									
Взаєм. інв. №									
Підп. і дата									
Інв. № подл	Ізм	Лист	№ докум	Підп.	Дата	ДП ПМ6102.000.200 СК			
	Разраб.		Василіук						
	Пров.		Писарець			Блок обчислювального пристрою Складальний кресленик	Лім.	Лист	Листів
									1
	Н.контр						ПБФ, КПІ		
	Затв.								



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**ПРИЛАДОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

***XIII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та  
молодих вчених***

# **"ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ"**

13-14 травня 2020 р.  
м. Київ, Україна

## **Збірник праць конференції**



КИЇВ 2020

Загальною метою конференції є спілкування студентів та аспірантів з питань перспективних розробок, нових рішень в приладобудуванні. Збірка містить 100 статей за результатами наукових та практичних досліджень з актуальних проблем автоматизації та приладобудування. Розраховано на аспірантів та студентів старших курсів з фаху «Автоматизація та приладобудування» і «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

Адреса Оргкомітету конференції:  
03056, Київ-56, пр. Перемоги, 37, корпус 1, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Приладобудівний факультет, 1720.

Рекомендовано до публікації на засіданні Організаційного комітету конференції та Вченої Ради ПБФ КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №3/20 від 27.04.2020 р.).

Відповідальний редактор – С.Л. Лакоза – к.т.н., доц.  
В авторській редакції.

Збірник праць XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ”, 13-14 травня 2020р. — К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2020. – 395 с.

Видано на замовлення Приладобудівного факультету Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”.

## **МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ МАСОВОЇ ВИТРАТИ**

**Анотація.** У статті розглянуто методи вимірювання масової витрати, що отримали найбільшого поширення у ракетній і авіаційній техніці, а також для вимірювання витрати нафтогазових потоків. Вивчено переваги і недоліки масових витратомірів прямої дії. Проведений порівняльний аналіз метрологічних характеристик витратомірів, що реалізують вихровий, силовий (вібраційний кориолісовий) і тепловий (калориметричний, термоанемометричний) методи вимірювання дозволив виявити їх індивідуальні експлуатаційні особливості.

**Ключові слова:** масова витрата, метод вимірювання, витратомір.

### **ВСТУП**

Основним фізичним параметром, що визначає оптимальні режими роботи об'єктів і якість процесів у системах автоматичного регулювання теплоенергетичних установок, різних хімічних процесах, ракетній і авіаційній техніці є масова витрата.

Методи вимірювання масової витрати умовно можна поділити на три групи [1, 2]:

- створення вимірювальних приладів здатних вимірювати безпосередньо масову витрату;
- застосування об'ємних витратомірів у комплексі з перетворювачами густини і обчислювачами;
- створення комбінованих витратомірів, що вимірюють масову витрату опосередкованими методами шляхом автоматичної обробки результатів прямих вимірювань пов'язаних з нею параметрів.

### **ПРИНЦИПОВІ ОСОБЛИВОСТІ МАСОВИХ ВИТРАТОМІРІВ**

Найбільш відпрацьованими і застосовуваними є масові витратоміри прямої дії, що відносяться до силового і теплового класів [1, 2].

У силових витратомірах потік набуває прискорення під дією силового збурення, залежного від масової витрати. Вимірюється будь-який параметр, що характеризує ступінь цього збурення або його ефекту.

Прискорення потоку виникає в процесі зміни його первинного руху. Залежно від характеру цієї зміни і прискорення, що надається при цьому, силові витратоміри поділяють на: кориолісові; гіроскопічні; турбосилові [2].

Найбільшого поширення серед них отримали вібраційні кориолісові витратоміри.

Кориолісовими називають витратоміри, в перетворювачах яких під впливом силового збурення виникає кориолісове прискорення, залежне від витрати [2].

До вібраційних відносяться кориолісові витратоміри, в яких рухомий елемент перетворювача витрати не обертається, а лише здійснює неперервні коливання з постійною амплітудою або з амплітудою, що періодично згасає, під впливом зовнішнього силового збурення [2].

Перевагами кориолісових витратомірів є: висока точність вимірювань; незалежність показань від в'язкості вимірюваного середовища; несуттєвий



вплив профілю швидкості вимірюваного потоку на результати вимірювань; тривалий термін експлуатації; відсутність жорстких вимог до довжини обов'язкових прямих ділянок до і після приладу; простота обслуговування [1, 2].

Недоліками таких приладів є гідравлічні втрати, пов'язані з особливостями конструкції.

Теплові витратоміри базуються на вимірюванні залежного від витрати ефекту теплового збурення на потік або тіло, яке контактує з ним. Такі прилади призначені для вимірювання витрати газу та рідше для вимірювання витрати рідини [2].

Існує багато різновидів теплових витратомірів, що розрізняються способом нагріву, розташуванням нагрівача (зовні або всередині трубопроводу) і характером функціональної залежності між витратою і вимірюваним сигналом.

За характером теплової взаємодії з потоком такі вимірювачі витрати поділяються на: калориметричні, термоконвективні і термоанемометричні [2].

Калориметричні витратоміри базуються на залежності від потужності нагріву середньо масової різниці температур потоку. Перевагами цього класу витратомірів є досить висока точність, що оцінюється (в умовах індивідуального калібрування) приведеною похибкою  $\pm(0,5-1,0) \%$ , широким діапазоном вимірювань, відносно малою інерційністю [1, 2].

Їх недоліками є складність вимірювальних схем і нестабільність характеристик, пов'язана з корозією приймальних пристроїв і осадженням на них різних частинок, які переносяться потоком [1].

У термоконвективних теплових витратомірах ні нагрівач, ні термоперетворювач не вводяться всередину трубопроводу, а розташовуються зовні. Передача тепла від нагрівача до вимірюваної речовини здійснюється через стінку труби за рахунок конвекції [2].

Перевагами таких вимірювачів витрати є відсутність контакту з вимірюваною речовиною; широкий діапазон швидкостей; висока швидкодія, що дозволяє вимірювати швидкості, змінні з частотою в декілька тисяч герц; підвищена експлуатаційна надійність.

Недоліками приладів у цьому випадку є значна інерційність; крихкість первинних перетворювачів внаслідок динамічних навантажень і високої температури нагрівання [2].

*Принцип дії термоанемометрів* базується на залежності між втратою тепла тіла, що неперервно нагрівається, та швидкістю вимірюваного середовища, в якому це тіло знаходиться.

Вони застосовуються для вимірювання витрати за відомого співвідношення між місцевою і середньою швидкостями потоку, або коли остання безпосередньо вимірюється за допомогою термоанемометра. Крім того, існують конструкції термоанемометрів, спеціально призначених для вимірювання витрати [2].

Перевагами термоанемометрів є широкий діапазон вимірюваних швидкостей і висока швидкодія [2].

Основним їх недоліком є істотний вплив на показання температури, тиску і

різних теплофізичних параметрів вимірюваного середовища [1, 2].

Для виявлення особливостей застосування масових витратомірів, що реалізують різні методи вимірювання, вивчено їх метрологічні і технічні характеристики (табл. 1).

Таблиця-1. Характеристики витратомірів

Параметр	EMIS-MASS 260 [3]	EMIS-VIHR 200 [4]	VA 420 [5]	Thermatel® Model TA2 [6]
Метод вимірювання	Кориолісо- вий	Вихровий	Тепловий	
			Калориметри чний	Термоанемомет ричний
Номінальний діаметр (DN), мм	50	50	50	50
Робоче середовище	Рідина, газ	Рідина, газ	Газ	Газ
Мінімальна витрата $Q_{\min}$ , кг/год	250 (для рідини і газу)	800 (для рідини); 12 (для газу)	2,4 (для газу)	14,5 (для газу)
Максимальна витрата $Q_{\max}$ , кг/год	55 000 (для рідини); 1 000 (для газу);	26 000 (для рідини); 240 (для газу);	1 100 (для газу)	1450 (для газу)
Діапазон вимірювання	1:220 (рідина) 1:4 (газ)	1:32 (рідина) 1:20 (газ)	1:450	1:100
Похибка	Залежно від класу точності можуть бути: $\pm 0,15\%$ , $\pm 0,25\%$ , $\pm 0,5\%$	$\pm 2,0\%$ (для рідини) і $\pm 2,6\%$ (для газів)	$\pm 1,5\%$ від показання + $0,05\%$ від повного значення від від каліброва- ної шкали	$\pm 1\%$ від показання + $0,5\%$ від повного значення від від каліброваної шкали
Втрати тиску, МПа	0,13	0,02	-	-
Робочий тиск, МПа	15	25	1,6	10,5
Температура робочого середовища, °C	-50 ÷ +350	-60 ÷ +460	-30 ÷ +80	-45 ÷ +200
Прямі ділянки до/після	0DN/0DN	10DN/5DN	15DN/5DN	8DN/5DN

## ВИСНОВКИ

У статті розглянуто методи вимірювання масової витрати і особливості їх застосування. Порівняння метрологічних характеристик вимірювачів масової витрати дозволило виявити наступне:

- силовий і вихровий методи вимірювання дозволяють вимірювати масову витрату як рідин, так і газів;
- найбільшого розповсюдження серед силових витратомірів отримали вібраційні кориолісові витратоміри, в яких рухомий елемент первинного перетворювача здійснює неперервні коливання з постійною амплітудою або з амплітудою, що періодично згасає;
- найточнішими серед розглянутих приладів є кориолісові витратоміри (їх похибка може сягати  $\pm 0,15\%$ );
- найдовших прямих ділянок при встановленні потребують калориметричні витратоміри;
- кориолісові витратоміри не потребують прямих ділянок;
- найбільший робочий тиск забезпечують вихрові витратоміри;
- найменша вимірювана витрата у калориметричного витратоміра газу;
- найбільшу максимальну витрату мають кориолісовий витратомір для рідини і термоанемометричний – для газу.

Результати порівняння технічних характеристик масових витратомірів різних класів дозволили виявити індивідуальні експлуатаційні особливості кожного методу вимірювання.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Хансуваров К. И., Цейтлин В. Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: Учебное пособие. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 287 с.: ил.
- [2] Кремлевский П. П., Расходомеры и счетчики количества: Справочник. – 4е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 701 с.: ил. – ISBN 5-217-00412-6
- [3] Расходомер массовый «ЭМИС-МАСС 260». [Електронний ресурс]: – Режим доступу: [https://emis-kip.ru/pics/uploads/MA\\_em260\\_RU\\_2009\\_.pdf](https://emis-kip.ru/pics/uploads/MA_em260_RU_2009_.pdf) – Назва з екрану.
- [4] Vortex Flow meters EMIS-VIHR 200 (EV-200). [Електронний ресурс]: – Режим доступу: [https://emis-meter.com/upload/iblock/ff7/EV200\\_205-PPD.-User-Manual.pdf](https://emis-meter.com/upload/iblock/ff7/EV200_205-PPD.-User-Manual.pdf) – Назва з екрану.
- [5] VA 420 Расходомер с дисплеем, 4 ... 20 А и импульсный вход. [Електронний ресурс]: – Режим доступу: [https://www.cs-instruments.com/fileadmin/cs-data/Bedienungsanleitungen/IMs%20RU/VA420\\_RUS\\_V4.02\\_2010\\_manua.pdf](https://www.cs-instruments.com/fileadmin/cs-data/Bedienungsanleitungen/IMs%20RU/VA420_RUS_V4.02_2010_manua.pdf) – Назва з екрану.

[6] THERMATEL® Усовершенствованный массовый расходомер модели TA2.  
[Электронный ресурс]: — Режим доступа:  
[https://www.magnetrol.com/sites/default/files/downloads/ru54-631-2\\_e-ta2.pdf](https://www.magnetrol.com/sites/default/files/downloads/ru54-631-2_e-ta2.pdf) —  
Назва з екрану.

*Наук. керівник – к.т.н., доц. Писарець А. В.*